

JP2001249720

Title:
POSITION CONTROLLER

Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To precisely adjust the fine model error of an object to be controlled while optimally holding a response to disturbance, and to realize quickly decidable control without exciting machine resonance by simple adjustment in a position controller for allowing a position command to follow up the actual position of the object to be controlled by using a model signal arithmetic unit. **SOLUTION:** This device is provided with a torque feedforward amplifier 10, a speed feedforward amplifier 11, and a position feedforward amplifier 12, and each torque feedforward gain α_t , speed feedforward gain α_v , and position feedforward gain α_x can be independently set so as to be made independent of a speed proportional gain K_v , a position proportional gain K_x , and a position integral gain K_i . Thus, it is possible to reduce overshoot while optimally maintaining characteristics against disturbance, and to realize quickly decidable control by simple fine adjustment.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-249720

(P2001-249720A)

(43) 公開日 平成13年9月14日 (2001.9.14)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テーマコード(参考)

G 0 5 D 3/12

G 0 5 D 3/12

S 5 H 0 0 4

G 0 5 B 11/32

G 0 5 B 11/32

F 5 H 3 0 3

H 0 2 P 5/00

H 0 2 P 5/00

X 5 H 5 5 0

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 27 頁)

(21) 出願番号 特願2000-62836(P2000-62836)

(22) 出願日 平成12年3月8日(2000.3.8)

(71) 出願人 000006013

三菱電機株式会社

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号

(72) 発明者 池田 英俊

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三

菱電機株式会社内

(72) 発明者 長野 鉄明

東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三

菱電機株式会社内

(74) 代理人 100093562

弁理士 児玉 俊英

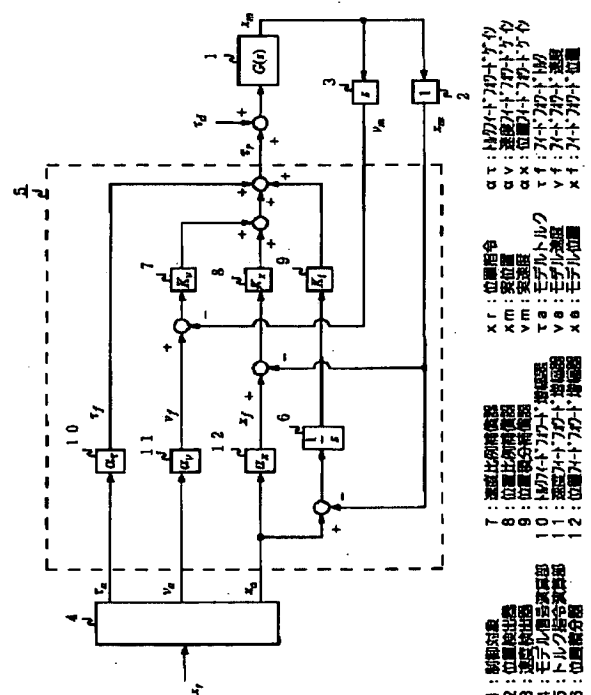
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 位置制御装置

(57) 【要約】

【課題】 モデル信号演算部を使用し、制御対象の実位置を位置指令に追従させる位置制御装置において、外乱に対する応答を最適に保ったまま、制御対象の微小なモデル誤差に対する調整を緻密に行い、また簡単な調整で、機械共振を励起せずに高速に整定する制御を実現するためのものである。

【解決手段】 トルクフィードフォワード増幅器10、速度フィードフォワード増幅器11および位置フィードフォワード増幅器12を備え、それぞれのトルクフィードフォワードゲイン α_t 、速度フィードフォワードゲイン α_v および位置フィードフォワードゲイン α_x を互いに独立に、かつ速度比例ゲイン K_v 、位置比例ゲイン K_x 、位置積分ゲイン K_i と独立に設定可能な構成とすることにより、簡単な微調整により、外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。



(2)

1

【特許請求の範囲】

【請求項1】 位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、

上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、

上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインを上記速度フィードフォワードゲインと独立に、かつ上記フィードバックゲインと独立に1以外の値に設定可能な構成としたことを特徴とする位置制御装置。

【請求項2】 位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、

上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、

上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとのすべてを上記フィードバックゲインと独立に設定可能な構成としたことを特徴とする位置制御装置。

【請求項3】 フィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを互いに独立に設定可能な構成としたことを特徴とする請求項2記載の位置制御装置。

2

【請求項4】 フィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、フィードバックゲインと独立な関係式を用いて設定する構成としたことを特徴とする請求項2記載の位置制御装置。

【請求項5】 フィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係式を用いて設定する構成としたことを特徴とする請求項4記載の位置制御装置。

(位置フィードフォワードゲイン) = (速度フィードフォワードゲイン) = (トルクフィードフォワードゲイン)

【請求項6】 フィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係式を用いて設定する構成としたことを特徴とする請求項4記載の位置制御装置。

(トルクフィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)³

(速度フィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)²

【請求項7】 外部からの位置指令 x_r と制御対象の位置検出信号である実位置 x_m 、速度検出信号である実速度 v_m とを入力しトルク指令 τ_r を出力し、上記実位置 x_m が上記位置指令 x_r に一致するように上記トルク指令 τ_r に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、

上記位置指令 x_r を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 x_a とこのモデル位置 x_a の微分信号であるモデル速度 v_a とこのモデル速度 v_a の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク τ_a とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク τ_a とモデル速度 v_a とモデル位置 x_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力し、位置比例ゲイン K_x と速度比例ゲイン K_v と位置積分ゲイン K_i とトルクフィードフォワードゲイン α_τ と速度フィードフォワードゲイン α_v と位置フィードフォワードゲイン α_x とを用いた次式で表される演算に基づいて上記トルク指令 τ_r を出力するトルク指令演算部を備えたことを特徴とする請求項1ないし6のいずれかに記載の位置制御装置。

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v \cdot (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x \cdot (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i \cdot (1/s) \cdot (x_a - x_m)$$

s : ラプラス演算子

【請求項8】 トルク指令演算部は、モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 v_a に速度フィードフォ

50

(3)

3

ードゲイン αv を乗算したフィードフォワード速度 $v f$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、モデル位置 $x a$ に位置フィードフォワードゲイン αx を乗算したフィードフォワード位置 $x f$ を出力する位置フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 $x a$ と実位置 $x m$ との偏差を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 $v f$ と実速度 $v m$ との偏差に速度比例ゲイン $K v$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記フィードフォワード位置 $x f$ と実位置 $x m$ との偏差に位置比例ゲイン $K x$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン $K i$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、上記フィードフォワードトルク τf および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 τr として出力することを特徴とする請求項7記載の位置制御装置。

【請求項9】 トルク指令演算部は、モデルトルク τa にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ を乗算したフィードフォワードトルク τf を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $v a$ に速度フィードフォワードゲイン αv を乗算したフィードフォワード速度 $v f$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル速度 $v a$ に位置フィードフォワード低減ゲイン βx を乗算したフィードフォワード位置 $x f$ を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 $x a$ と実位置 $x m$ との偏差から上記フィードフォワード位置 $x f$ を減算した信号を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 $v f$ と実速度 $v m$ との偏差に速度比例ゲイン $K v$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記モデル位置 $x a$ と実位置 $x m$ との偏差に位置比例ゲイン $K x$ を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン $K i$ を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、位置フィードフォワードゲイン αx は次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク τf および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 τr として出力することを特徴とする請求項7記載の位置制御装置。

$$\alpha x = 1 - K i \cdot \beta x / K x$$

【請求項10】 トルク指令演算部は、モデルトルク τa にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ を乗算したフィードフォワードトルク τf を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 $v a$ に速度フィードフォワード低減ゲイン γv を乗算したフィードフォワード速度 $v f$ を出力する速度フィードフォワード低減器、モデル位置 $x a$ に位置フィードフォワード低減ゲイン γx を乗算したフィードフォワード位置 $x f$ を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 $x a$ と実位置 $x m$ との偏差に位置ゲイン ωx を乗算した信号を出力する位置補償器、および上記モデル速度 $v a$ と実速度 $v m$ との

4

偏差に上記位置補償器の出力を加算した信号を入力し、速度比例ゲイン $K v$ と積分ゲイン $\omega P I$ の $P I$ （比例積分）演算を行って誤差補償トルク τc を出力する速度 $P I$ 補償器を備え、

速度フィードフォワードゲイン αv および位置フィードフォワードゲイン αx はそれぞれ次式で設定するとともに、

上記フィードフォワードトルク τf からフィードフォワード速度 $v f$ とフィードフォワード位置 $x f$ とを減算した信号に誤差補償トルク τc を加算した信号をトルク指令 τr として出力することを特徴とする請求項7記載の位置制御装置。

$$\alpha v = 1 - \gamma v / K v$$

$$\alpha x = 1 - \gamma x / \{K v (\omega x + \omega P I)\}$$

【請求項11】 外部からの位置指令 $x r$ と制御対象の位置検出信号である実位置 $x m$ 、速度検出信号である実速度 $v m$ とを入力しトルク指令 τr を出力し、上記実位置 $x m$ が上記位置指令 $x r$ に一致するように上記トルク指令 τr に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 $x r$ を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 $x a$ とこのモデル位置 $x a$ の微分信号であるモデル速度 $v a$ とこのモデル速度 $v a$ の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク τa とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク τa にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ を乗算したフィードフォワードトルク τf を出力するトルクフィードフォワード増幅器、上記モデル速度 $v a$ に速度フィードフォワードゲイン αv を乗算したフィードフォワード速度 $v f$ を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 $x a$ と実位置 $x m$ との偏差に位置積分ゲイン ωi を乗算した信号を出力する位置積分補償器、位置積分補償器の出力から上記モデル速度 $v a$ とフィードフォワード速度 $v f$ との偏差を減算した信号を積分した信号を出力する積分器、上記モデル位置 $x a$ と実位置 $x m$ との偏差に上記積分器の出力を加算した信号に位置ゲイン ωx を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記フィードフォワード速度 $v f$ と実速度 $v m$ との偏差に上記位置比例補償器の出力を加算した信号に速度比例ゲイン $K v$ を乗算した信号を出力する速度比例補償器を設け、上記フィードフォワードトルク τf と速度比例補償器の出力信号との加算値をトルク指令 τr として出力するトルク指令演算部を備え、位置フィードフォワードゲイン αx を下式で設定することを特徴とする請求項2記載の位置制御装置。

$$\alpha x = \alpha v$$

【請求項12】 モデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成したことを特徴とする請求項1ないし11のいずれかに記載の位置制御装

(4)

5

置。

【請求項13】 位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、
 上記モデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成し、
 上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、
 上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、かつ、少なくとも上記位置フィードフォワードゲインは1以外の値に設定可能な構成としたことを特徴とする位置制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、工作機械などにおいて電動機等のトルク発生器を用いて機械系の位置制御を行う制御装置に関する。

$$x_m = G(s) \cdot \tau_r + G(s) \cdot \tau_d \quad \dots \dots (式1)$$

【0004】また、制御対象1が完全な剛体機械であると考え、制御対象1の伝達特性 $G(s)$ は次の式2で表される。

$$G(s) = 1 / (J \cdot s^2) \quad \dots \dots (式2) \quad *$$

$$G(s) = 1 / (J \cdot s^2 + f \cdot s) \quad \dots \dots (式3)$$

【0006】次にモデル信号演算部4の動作について説明する。モデル信号演算部4は外部から位置制御装置に与える位置指令 x_r を入力し、ローパス特性であるモデル伝達特性 $G_a(s)$ の伝達関数演算に基づくモデル位置 x_a と、モデル位置 x_a の微分信号であるモデル速度 v_a と、モデル速度 v_a の微分信号であるモデル加速度 a_a と、予め推定した制御対象のイナーシャ値であるモデルイナーシャ J_a をモデル加速度 a_a に乗じた信号であるモデルトルク τ_a を演算し、上記のモデル位置 x_a とモデル速度 v_a とモデルトルク τ_a とを出力する。★

$$x_m / x_r = x_a / x_r = G_a(s) \quad \dots \dots (式4)$$

【0008】次にトルク指令演算部505の動作について説明する。実際の制御対象1には外乱やモデル誤差が存在するため、実位置 x_m とモデル位置 x_a および実速度 v_m とモデル速度 v_a との間には誤差が生じる。位置

6

* 【0002】

【従来の技術】モータなどのトルク発生器を用いて工作機械などの位置制御を行う位置制御装置では、高速高精度な位置決め制御を実現するために、機械共振を励起しないような制御が望まれ、また、整定時にオーバーシュートを起こすとクーロン摩擦の影響で整定時間が長くなるためオーバーシュートを起こさないような制御が望まれる。また、このような位置制御装置では、フィードフォワードを用いて位置指令に対する追従性を高速化させることが行われる。

【0003】図12は、例えば「計測と制御」vol. 12, p. 1010~p. 1011に記載の第1の従来技術の位置制御装置の構成を示すブロック図である。図12において、1はトルク指令 τ_r に応じたトルクを発生することにより機械系を駆動する制御対象である。2は制御対象1の位置である実位置 x_m を検出する位置検出器である。3は実位置 x_m の微分信号である実速度 v_m を検出する速度検出器である。4は位置指令 x_r を入力しモデル位置 x_a とモデル速度 v_a とモデルトルク τ_a とを出力するモデル信号演算部である。505はトルク指令演算部である。506は位置補償器である。507は速度PI補償器である。次に図12に示した第1の従来技術の動作について説明する。まず、制御対象1の特性について説明する。制御対象1における発生トルクがトルク指令 τ_r に理想的に一致するとした場合、制御対象1の伝達特性を $G(s)$ と記述すると、トルク指令 τ_r および外乱トルク τ_d と実位置 x_m との関係は次の式1で表される。ただし、次式および以降において s はラプラス演算子を表す。

※ 【0005】しかしながら実際の制御対象には機械共振や摩擦などのモデル誤差が存在し、例えば摩擦係数 f の粘性摩擦が存在する場合の制御対象の伝達特性 $G(s)$ は次の式3となる。

★ 【0007】ここで、外乱トルク τ_d が無く、制御対象1の特性が理想的な剛体機械でそのイナーシャ J がモデルイナーシャ J_a に一致する場合（以下ではこれを理想モデルの場合と記述する）、上記のモデルトルク τ_a を用いて制御対象1を駆動すれば、制御対象1の実位置 x_m とモデル位置 x_a および実速度 v_m とモデル速度 v_a とが完全に一致し、位置指令 x_r から実位置 x_m までの伝達特性はモデル伝達特性 $G_a(s)$ に一致する。すなわち次の式4が成り立つ。

補償器506はモデル位置 x_a と実位置 x_m との差を位置ゲイン ω_x 倍した信号を出力し、速度PI補償器507はモデル速度 v_a と実速度 v_m との差信号に位置補償器506の出力を加えた信号を入力し、速度比例ゲイン

(5)

7
 K_v と積分ゲイン ω_{PI} のPI (比例積分) 演算を行って誤差補償トルク τ_c を出力する。また、トルク指令演算部505はモデルトルク τ_a と誤差補償トルク τ_c の*

$$\tau_r = \tau_a + K_v \cdot (1 + \omega_{PI}/s) \{v_a - v_m + \omega_x (x_a - x_m)\} \quad \dots (式5)$$

【0009】トルク指令演算部505は上記のモデルトルク τ_a と誤差補償トルク τ_c との和信号をトルク指令 τ_r として出力することにより、制御対象1が理想モデルの場合には、モデルトルク τ_a だけで、また制御対象1にモデル誤差が有った場合には誤差補償トルク τ_c を加えて制御対象1を駆動することにより、実位置 x_m がモデル位置 x_a に追従するように制御する。

【0010】また、モデル伝達特性 $G_a(s)$ はローパス特性としているため、制御対象1に機械共振など高い周波数のモデル誤差が存在した場合には、モデル伝達特性 $G_a(s)$ の応答を遅く、すなわちローパス特性の遮断周波数を低くすることにより機械共振が抑制され、結果的に高速な整定を実現することができる。

【0011】このように、第1の従来技術は、モデル伝達特性 $G_a(s)$ をローパス特性とすることで比較的高周波域 (数10Hz程度) の機械共振を抑制している。しかし、同じくこのモデル伝達特性 $G_a(s)$ のローパス特性に期待してオーバーシュートをも抑制しようとすると、このオーバーシュートは更に低い周波数域 (数Hz程度以下) での現象であるので、モデル伝達特性 $G_a(s)$ をこれに合わせた特性のものとすると、制御応答が非常に遅くなり、高速に整定する制御の実現が困難であった。

【0012】次に、図13は、例えば特開平05-216540号公報に記載の第2の従来技術の制御系構成図である。図13では離散時間系の制御系を連続時間系に変換して、等価的に記載している。図13において図12と同一符号は同一部分を示す。605はトルク指令演算部である。606は位置補償器、607は速度PI補償器である。612はトルクフィードフォワード増幅器、611は速度フィードフォワード増幅器である。6※

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v \cdot (1 + \omega_{PI}/s) \{\alpha_v \cdot v_r - v_m + \omega_x (x_r - x_m)\} \quad \dots (式6)$$

【0016】第2の従来技術は上記のように構成することにより、トルクフィードフォワードゲイン α_τ と速度フィードフォワードゲイン α_v を1とすると、制御対象1が理想モデルの場合には位置指令 x_r と実位置 x_m とが一致するような制御が可能になる。また、制御対象1のモデル誤差や外乱トルク τ_d に対しては誤差補償トルク τ_c によって補償される。ここで、また更に、トルクフィードフォワードゲイン α_τ および速度フィードフォワードゲイン α_v を1から変更して微調整を行い、制御対象1のモデル誤差による位置指令 x_r に対する実位置 x_m の微小な応答誤差を修正する。

【0017】しかしながら第2の従来技術では、トルク

8
 *和信号をトルク指令 τ_r として出力する。すなわちトルク指令演算部505は以下の式5の演算によりトルク指令 τ_r を演算する。

※08は第1の微分器、609は第2の微分器、610はイナーシャ増幅器である。

【0013】次に第2の従来技術の動作について説明する。第1の従来技術と同一部分は、その動作の説明を省略する。第1の微分器608は位置指令 x_r を微分して速度指令 v_r を出力し、第2の微分器609は速度指令 v_r を微分して加速度指令 a_r を出力し、イナーシャ増幅器610は加速度指令 a_r に予め設定した制御対象1のイナーシャの推定値 J_a を乗じたモデルトルク τ_a を出力する。

【0014】次にトルク指令演算部605の動作について説明する。トルク指令演算部605は位置指令 x_r と速度指令 v_r とモデルトルク τ_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力する。トルク指令演算部605の内部においてトルクフィードフォワード増幅器612はモデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗じたフィードフォワードトルク τ_f を出力し、速度フィードフォワード増幅器611は速度指令 v_r に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗じたフィードフォワード速度 v_f を出力する。

【0015】次に位置補償器606は位置指令 x_r と実位置 x_m との差信号に位置ゲイン ω_x を乗じた信号を出力し、速度PI補償器607はフィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との差信号に位置補償器606の出力を加えた信号を入力し、速度比例ゲイン K_v と積分ゲイン ω_{PI} のPI (比例積分) 演算を行って誤差補償トルク τ_c を出力する。また、トルク指令演算部605はモデルトルク τ_a と誤差補償トルク τ_c との和信号をトルク指令 τ_r として出力する。すなわちトルク指令演算部605は以下の式6の演算によりトルク指令 τ_r を演算する。

フィードフォワードゲイン α_τ を0にしなければ位置指令 x_r を2階微分した信号成分が直接トルク指令 τ_r に印加されるため、トルク指令 τ_r に高周波数成分が含まれ、制御対象1の特性に高周波数の機械共振が含まれている場合には、機械共振を励起して高速な整定を実現するのが困難だという問題が有った。

【0018】また、伝達特性で考えると速度の積分は位置であるため、第2の従来技術では、次の式7、式8の関係をを用い、信号をトルク、速度、位置、位置の積分の次元で纏めるように式6を変換すると、トルク指令演算部605は以下の式9の演算を行うことになる。

50

(6)

9

10

$$x_r = (1/s) v_r \quad \dots \dots (式7)$$

$$x_m = (1/s) v_m \quad \dots \dots (式8)$$

$$\tau_r = \alpha \tau \cdot \tau a + K_v (\alpha v \cdot v_r - v_m) + K_v (\omega P I + \omega x) (\alpha x$$

$$\cdot x_r - x_m) + K_v \cdot \omega x \cdot \omega P I (1/s) (x_r - x_m) \quad \dots \dots (式9)$$

ただし、上記の αx は次の式10で表される。

$$\alpha x = (\alpha v \cdot \omega P I + \omega x) / (\omega P I + \omega x) \quad \dots \dots (式10)$$

【0019】式10の αx を位置フィードフォワードゲインと呼ぶとすると、図13に示す構造の第2の従来技術では、位置フィードフォワードゲイン αx を位置ゲイン ωx 、積分ゲイン $\omega P I$ 、速度フィードフォワードゲイン αv と独立に調整することができない。ここで、位置ゲイン ωx および積分ゲイン $\omega P I$ は外乱トルク τd に対する応答を決定する制御ゲインすなわちフィードバックゲインである。したがって、外乱トルク τd に対する特性すなわちフィードバック特性を最適に保ったまま、トルクフィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ 、速度フィードフォワードゲイン αv 、位置フィードフォワードゲイン αx を最適に設定することが困難であるため、制御対象1のモデル誤差に対応した最適な調整が困難であるという問題が有る。また、オーバーシュートを抑制するための調整を簡単に行うのが困難であるという問題が有る。

【0020】

【発明が解決しようとする課題】以上のように、第1の従来技術では、整定時のオーバーシュートを抑制しようとする、位置指令 x_r に対するモデル位置 x_m の応答をかなり遅くする必要があるため、実位置 x_m の応答が遅くなり、高速な整定を得るのが困難であるという問題が有った。

【0021】また、第2の従来技術では、高速な応答を得ようするとトルク指令 τ_r に高周波数成分が印加されるため、制御対象1に機械共振が有る場合には共振を励起し、高速な整定を得るのが困難であるという問題があった。また、位置フィードフォワードゲイン αx をフィードバックゲインおよび速度フィードフォワードゲイン αv と独立に設定できないため、外乱に対する応答を最適に保ったまま、制御対象の微少なモデル誤差に対して高速な整定を得るような、最適な制御を実現するのが困難であるという問題が有った。また、簡単な演算や簡単な調整でオーバーシュートを抑制して高速に整定する制御が困難であるという問題が有った。

【0022】本発明は上記のような問題を解決するためになされたものであり、外乱に対する応答を最適に保ったまま、制御対象の微少なモデル誤差に対する調整を緻密に行い、また簡単な調整で、機械共振を励起せずに高速に整定する制御を実現するためのものである。

【0023】

【課題を解決するための手段】この発明に係る位置制御装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデル

トルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインを上記速度フィードフォワードゲインと独立に、かつ上記フィードバックゲインと独立に1以外の値に設定可能な構成としたものである。

【0024】この発明に係る位置制御装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとのすべてを上記フィードバックゲインと独立に設定可能な構成としたものである。

【0025】この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォー

(7)

11

ドゲインとを互いに独立に設定可能な構成としたものである。

【0026】この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、フィードバックゲインと独立な関係式を用いて設定する構成としたものである。

【0027】この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたものである。

(位置フィードフォワードゲイン) = (速度フィードフォワードゲイン) = (トルクフィードフォワードゲイン)

【0028】この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたものである。

(トルクフィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)³

(速度フィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン)²

【0029】この発明に係る位置制御装置は、外部からの位置指令 x_r と制御対象の位置検出信号である実位置 x_m 、速度検出信号である実速度 v_m とを入力しトルク指令 τ_r を出力し、上記実位置 x_m が上記位置指令 x_r に一致するように上記トルク指令 τ_r に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 x_r を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 x_a とこのモデル位置 x_a の微分信号であるモデル速度 v_a とこのモデル速度 v_a の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク τ_a とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク τ_a とモデル速度 v_a とモデル位置 x_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力し、位置比例ゲイン K_x と速度比例ゲイン K_v と位置積分ゲイン K_i とトルクフィードフォワードゲイン α_τ と速度フィードフォワードゲイン α_v と位置フィードフォワードゲイン α_x とを用いた次式で表される演算に基づいて上記トルク指令 τ_r を出力するトルク指令演算部を備えたものである。

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v \cdot (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x \cdot (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i \cdot (1/s) \cdot (x_a - x_m)$$

s : ラプラス演算子

【0030】この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f

12

を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗算したフィードフォワード速度 v_f を出力する速度フィードフォワード増幅器、モデル位置 x_a に位置フィードフォワードゲイン α_x を乗算したフィードフォワード位置 x_f を出力する位置フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との偏差に速度比例ゲイン K_v を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記フィードフォワード位置 x_f と実位置 x_m との偏差に位置比例ゲイン K_x を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン K_i を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、上記フィードフォワードトルク τ_f および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 τ_r として出力するものである。

【0031】この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗算したフィードフォワード速度 v_f を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル速度 v_a に位置フィードフォワード低減ゲイン β_x を乗算したフィードフォワード位置 x_f を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差から上記フィードフォワード位置 x_f を減算した信号を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との偏差に速度比例ゲイン K_v を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置比例ゲイン K_x を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン K_i を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、位置フィードフォワードゲイン α_x は次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク τ_f および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 τ_r として出力するものである。

$$\alpha_x = 1 - K_i \cdot \beta_x / K_x$$

【0032】この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 v_a に速度フィードフォワード低減ゲイン γ_v を乗算したフィードフォワード速度 v_f を出力する速度フィードフォワード低減器、モデル位置 x_a に位置フィードフォワード低減ゲイン γ_x を乗算したフィードフォワード位置 x_f を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置ゲイン ω_x を

(8)

13

乗算した信号を出力する位置補償器、および上記モデル速度 v_a と実速度 v_m との偏差に上記位置補償器の出力を加算した信号を入力し、速度比例ゲイン K_v と積分ゲイン ω_{PI} の PI (比例積分) 演算を行って誤差補償トルク τ_c を出力する速度 PI 補償器を備え、速度フィードフォワードゲイン α_v および位置フィードフォワードゲイン α_x はそれぞれ次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク τ_f からフィードフォワード速度 v_f とフィードフォワード位置 x_f とを減算した信号に誤差補償トルク τ_c を加算した信号をトルク指令 τ_r として出力するものである。

$$\alpha_v = 1 - \gamma_v / K_v$$

$$\alpha_x = 1 - \gamma_x / \{K_v (\omega_x + \omega_{PI})\}$$

【0033】この発明に係る位置制御装置は、外部からの位置指令 x_r と制御対象の位置検出信号である実位置 x_m 、速度検出信号である実速度 v_m とを入力しトルク指令 τ_r を出力し、上記実位置 x_m が上記位置指令 x_r に一致するように上記トルク指令 τ_r に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 x_r を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 x_a とこのモデル位置 x_a の微分信号であるモデル速度 v_a とこのモデル速度 v_a の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク τ_a とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f を出力するトルクフィードフォワード増幅器、上記モデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗算したフィードフォワード速度 v_f を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置積分ゲイン ω_i を乗算した信号を出力する位置積分補償器、位置積分補償器の出力から上記モデル速度 v_a とフィードフォワード速度 v_f との偏差を減算した信号を積分した信号を出力する積分器、上記モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に上記積分器の出力を加算した信号に位置ゲイン ω_x を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記フィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との偏差に上記位置比例補償器の出力を加算した信号に速度比例ゲイン K_v を乗算した信号を出力する速度比例補償器を設け、上記フィードフォワードトルク τ_f と速度比例補償器の出力信号との加算値をトルク指令 τ_r として出力するトルク指令演算部を備え、位置フィードフォワードゲイン α_x を下式で設定するものである。

$$\alpha_x = \alpha_v$$

【0034】この発明に係る位置制御装置のモデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性 *

$$x_m = G(s) \cdot \tau_r + G(s) \cdot \tau_d \quad \dots \text{(式1)}$$

【0038】また、制御対象1が完全な剛体機械であるとした場合、制御対象1の伝達特性 $G(s)$ は次の式2

14

* が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成したものである。

【0035】この発明に係る位置制御装置の位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記モデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成し、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、かつ、少なくとも上記位置フィードフォワードゲインは1以外の値に設定可能な構成としたものである。

【0036】

【発明の実施の形態】実施の形態1. 図1はこの発明における実施の形態1の位置制御装置の構成を示すブロック図である。図1において、1はトルク指令 τ_r に応じたトルクを発生することにより機械系を駆動する制御対象である。2は制御対象1の位置である実位置 x_m を検出する位置検出器である。3は実位置 x_m の微分信号である実速度 v_m を検出する速度検出器である。4は外部から位置指令 x_r を入力しモデル位置 x_a とモデル速度 v_a とモデルトルク τ_a とを出力するモデル信号演算部である。5はトルク指令演算部である。6は位置積分器である。7は速度比例補償器、8は位置比例補償器、9は位置積分補償器である。10はトルクフィードフォワード増幅器、11は速度フィードフォワード増幅器、12は位置フィードフォワード増幅器である。

【0037】次に実施の形態1の動作について説明する。まず、制御対象1の特性について説明する。制御対象1における発生トルクがトルク指令 τ_r に理想的に一致するとした場合、制御対象1の伝達特性を $G(s)$ と記述すると、トルク指令 τ_r および外乱トルク τ_d と実位置 x_m との関係は次の式1で表される。ただし、次式および以降において s はラプラス演算子を表す。

で表される。ただし、下式において J は制御対象1のイナーシャである、

(9)

15

$$G(s) = 1 / (J \cdot s^2) \quad \dots \dots (式2)$$

【0039】しかしながら実際の制御対象1には機械共振や摩擦などのモデル誤差が存在し、例えば摩擦係数 f *

$$G(s) = 1 / (J \cdot s^2 + f \cdot s) \quad \dots \dots (式3)$$

【0040】次にモデル信号演算部4の動作を説明する。モデル信号演算部4は外部から位置制御装置に与える位置指令 x_r を入力し、ローパス特性であるモデル伝達特性 $G_a(s)$ の伝達関数演算に基づいてモデル位置 x_a を演算し、更にモデル位置 x_a の微分信号であるモデル速度 v_a と、モデル速度 v_a の微分信号であるモデル加速度 a_a を演算し、更にモデル信号演算部4は予め※

$$G_a(s) = 1 / (s + \omega_a)^2 \quad \dots \dots (式11)$$

ここで、上記の式11における ω_a はモデルの応答周波数、すなわちローパス特性の遮断周波数で、位置指令 x_r に対するモデルの応答の速さを決定するものである。★

$$x_a = G_a(s) \cdot x_r \quad \dots \dots (式12)$$

$$v_a = s \cdot G_a(s) \cdot x_r \quad \dots \dots (式13)$$

$$\tau_a = J a \cdot s^2 \cdot G_a(s) \cdot x_r \quad \dots \dots (式14)$$

【0042】次にトルク指令演算部5の動作について説明する。トルク指令演算部5はモデルトルク τ_a とモデル速度 v_a とモデル位置 x_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力する。トルク指令演算部5の内部においてトルクフィードフォワード増幅器10はモデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗じたフィードフォワードトルク τ_f を出力し、速度フィードフォワード増幅器11はモデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗じたフィードフォワード速度 v_f を出力し、位置フィードフォワード増幅器12はモデル位置 x_a に位置フィードフォワードゲイン α_x を乗じたフィードフォワード位置 x_f を出力する。

【0043】次に位置積分器6はモデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差を積分した信号を出力し、速度比例補償☆

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m) \quad \dots \dots (式15)$$

【0045】また、トルク指令演算部5は、トルクフィードフォワード増幅器10によりトルクフィードフォワードゲイン α_τ を、速度フィードフォワード増幅器11により速度フィードフォワードゲイン α_v を、位置フィードフォワード増幅器12により位置フィードフォワードゲイン α_x を、速度比例補償器7により速度比例ゲイン K_v を、位置比例補償器8により位置比例ゲイン K_x を、位置積分補償器9により位置積分ゲイン K_i を設定するため、トルクフィードフォワードゲイン α_τ と速度フィードフォワードゲイン α_v と位置フィードフォワードゲイン α_x とは互いに独立に、なおかつ速度比例ゲイン K_v および位置比例ゲイン K_x および位置積分ゲイン K_i と独立に設定することが可能である。なお、以降では速度比例ゲイン K_v と位置比例ゲイン K_v と位置積分ゲイン K_i とを総称してフィードバックゲインと呼び、トルクフィードフォワードゲイン α_τ 、速度フィード

16

*の粘性摩擦が存在する場合の制御対象の伝達特性 $G(s)$ は次の式3となる。

※設定した制御対象のイナーシャ値であるモデルイナーシャ J_a をモデル加速度 a_a に乗じた信号であるモデルトルク τ_a を演算し、上記のモデル位置 x_a とモデル速度 v_a とモデルトルク τ_a とを出力する。モデル伝達特性 $G_a(s)$ は例えば次の式11のような2次のローパス特性を選ぶ。

★【0041】以上の動作によりモデル信号演算部4では以下の式12、式13、式14の伝達関数演算を行っている。

☆器7はフィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との偏差に速度比例ゲイン K_v を乗じた信号を出力し、位置比例補償器8はフィードフォワード位置 x_f と実位置 x_m との偏差に位置比例ゲイン K_x を乗じた信号を出力し、位置積分補償器9は位置積分器6の出力信号に位置積分ゲイン K_i を乗じた信号を出力し、トルク指令演算部5はフィードフォワードトルク τ_f と速度比例補償器7の出力と位置比例補償器8の出力と位置積分補償器9の出力との和信号をトルク指令 τ_r として出力することにより制御対象1を制御する。

【0044】以上のように構成することによりトルク指令演算部5は、モデル位置 x_a 、モデル速度 v_a 、モデルトルク τ_a 、実位置 x_m 、実速度 v_m を入力し次の式15の伝達関数演算によりトルク指令 τ_r を出力する。

フィードフォワードゲイン α_v 、位置フィードフォワードゲイン α_x を総称してフィードフォワードゲインと呼ぶ。

【0046】また、以降では制御対象1が式1で表される理想的剛体機械で、モデル信号演算部4のモデルイナーシャ J_a と制御対象1のイナーシャ J が一致する場合を、制御対象1が理想モデルの場合と呼ぶことにする。

【0047】図1においてフィードフォワードゲイン α_τ 、 α_v 、 α_x を全て1にした場合は、第1の従来技術から図1への等価変換が可能である。すなわち図1の制御系は第1の従来技術と同様に動作し、制御対象1が理想モデルの場合は、位置指令 x_r に対して実位置 x_m とモデル位置 x_a とが完全に一致する。しかしながら、制御対象1が例えば式3のようにモデル誤差を持った場合、そのモデル誤差が微少でも、実位置 x_m が微少のオーバーシュートを起こすなどの問題を生じる。

【0048】次にトルク指令演算部5におけるフィード

(10)

17

バックゲイン K_v 、 K_x 、 K_i の設定について図2を用いて説明する。図2は外乱 τ_d に対する実位置 x_m のステップ応答を示す図である。

【0049】フィードバックゲイン K_v 、 K_x 、 K_i は、外乱 τ_d に対して実位置 x_m と位置指令 x_r との誤差の変動がなるべく小さくなるように設定する。図1における外乱 τ_d から実位置 x_m までの伝達特性を $G_\tau(s)$ と記述すると、 $G_\tau(s)$ のステップ応答の概形は図2に示すような安定な波形になる。すなわち通常は $G_\tau(s)$ のステップ応答が、正の方向だけに変動して*

$$G_{\tau 1}(s) = s / (J \cdot s^3 + K_v \cdot s^2 + K_x \cdot s + K_i) \quad \dots \quad (式16)$$

【0050】次にフィードフォワードゲイン α_τ 、 α_v 、 α_x の設定について、図3に示す一般的な2自由度制御系ブロックを用いて説明する。なお、図3の一般的な2自由度制御系は制御系の応答特性を解析するために用いるものである。図3において、図1と同一符号は同一部分を示す。13はフィードバック制御器である。14はフィードフォワード制御器である。

【0051】次に図3に示す一般的な2自由度制御系の動作について説明する。フィードフォワード制御器14は位置指令 x_r を入力し $C_f(s)$ の伝達関数演算によりフィードフォワードトルク τ_f を出力する。フィード※

$$C_f(s) = G_a(s) \cdot G_f(s) \quad \dots \quad (式17)$$

$$C_b(s) = K_v \cdot s + K_x + K_i / s \quad \dots \quad (式18)$$

ただし、上記の式17において

$$G_f(s) = (\alpha_\tau \cdot J a \cdot s^3 + \alpha_v \cdot K_v \cdot s^2 + \alpha_x \cdot K_x \cdot s + K_i) / s \quad \dots \quad (式19)$$

である。また、次の式20のようにフィードフォワードゲイン α_τ 、 α_v 、 α_x の全てを1とおいた場合の $G_f \star$

$$G_{f1}(s) = (J a \cdot s^3 + K_v \cdot s^2 + K_x \cdot s + K_i) / s \quad \dots \quad (式20)$$

【0053】次に、フィードフォワードトルク τ_f から実位置 x_m までの伝達関数は外乱トルク τ_d から実位置 x_m までの応答 $G_\tau(s)$ と全く同じである。したがって☆

$$\begin{aligned} x_m / x_r &= C_f(s) \cdot G_\tau(s) \\ &= G_a(s) \cdot G_f(s) \cdot G_\tau(s) \quad \dots \quad (式21) \end{aligned}$$

【0054】ここで、上式において $G_a(s)$ は上述のように、モデル信号演算部4の伝達特性 $G_a(s)$ であり、これをローパス特性とすることにより、モデル信号演算部4および制御対象1の応答の速さを設定する部分である。また、式21で表される位置指令 x_r から実位◆

$$G_f(s) \cdot G_\tau(s) = (\alpha_\tau \cdot J a \cdot s^2 + \alpha_v \cdot K_v \cdot s + \alpha_x \cdot K_x + K_i / s) \cdot G_\tau(s) \quad \dots \quad (式22)$$

【0055】上記の式22より、 $G_f(s) \cdot G_\tau(s)$ の応答は図2に示した外乱応答 $G_\tau(s)$ の積分、比例、微分、2階微分の応答の線形和となる。図4に $K_i \cdot G_\tau(s) / s$ 、 $K_x \cdot G_\tau(s)$ 、 $K_v \cdot s \cdot G_\tau(s)$ 、 $J a \cdot s^2 \cdot G_\tau(s)$ のステップ応答をそれぞれ示す。また、制御対象1が理想モデルの場

18

*負の方向へ行きすぎないようにフィードバックゲイン K_v 、 K_x 、 K_i を設定する。なお、この $G_\tau(s)$ は、制御対象1を含む閉回路の応答であって、制御対象1の伝達特性 $G(s)$ と後述するフィードバック制御系の伝達特性 $C_b(s)$ とから以下の式により表される。
 $G_\tau(s) = G(s) / \{1 + G(s) \cdot C_b(s)\}$
 また、制御対象1が式2の理想的な剛体機械とした場合の $G_\tau(s)$ を $G_{\tau 1}(s)$ と記述すると、 $G_{\tau 1}(s)$ は次の式16となる。

※バック制御器13は実位置 x_m を入力し $C_b(s)$ の伝達関数演算によりフィードバックトルク τ_b を出力する。図3の2自由度制御系ではフィードフォワードトルク τ_f とフィードバックトルク τ_b の和をトルク指令 τ_r として制御対象1を駆動する。

【0052】図1のモデル信号演算部4およびトルク指令演算部5を図3の一般的な2自由度制御系に等価変換すると、フィードフォワード制御器14の伝達特性 $C_f(s)$ およびフィードバック制御器13の伝達特性 $C_b(s)$ は次の式17および式18で表される。

★(s)を $G_{f1}(s)$ とおく。

☆て、位置指令 x_r から実位置 x_m までの応答は次の式21で表される。

◆置 x_m までの応答からモデル伝達特性を除いた伝達特性 $G_f(s) \cdot G_\tau(s)$ が応答を補正する特性となり、この $G_f(s) \cdot G_\tau(s)$ の伝達特性は式19より次の式22となる。

合、フィードフォワードゲイン α_τ 、 α_v 、 α_x を全て1とすると $G_f(s) \cdot G_\tau(s)$ は $G_{f1}(s) \cdot G_{\tau 1}(s)$ となり、上述の説明および式16と式20より、 $G_f(s) \cdot G_\tau(s)$ の伝達特性は1に一致する。すなわち、この場合には、図4に示した4つの波形を加算すると1となる。したがって、フィードフォー

(11)

19

ドゲイン $\alpha\tau$ 、 αv 、 αx は、1を基準に設定するものである。

【0056】ここで、上述のように制御対象1にはモデル誤差が有るため、 $Gf(s) \cdot G\tau(s)$ の応答は1に近いながらも微少な誤差を生じる。位置指令 x_r から実位置 x_m までの応答は上記の式21であるため、式11に示したモデルの応答 $G_a(s)$ の応答周波数 ω_a を小さくすると、モデルの応答自体の高い周波数成分が除去されるため、モデル位置 x_a と実位置 x_m との誤差が小さくなる。したがって、機械共振などの高周波数で生じる誤差については、モデルの応答周波数 ω_a を所定量小さくすることによって、モデルの応答をそれほど遅くすることなく、モデル位置 x_a と実位置 x_m との誤差を小さくすることができる。しかしながら、式3に示した粘性摩擦や、それによって生じるオーバーシュートなどの比較的低い周波数で生じる誤差について、モデルの応答周波数 ω_a を更に小さくして誤差を低減しようとする

と、第1の従来技術で説明した通り、モデルの応答周波数 ω_a をかなり小さくする必要が有るため、結果的に位置指令 x_r に対する実位置 x_m の応答がかなり遅くなってしまう。

【0057】そこで、例えば位置フィードフォワードゲイン αx を1から減じた場合、 $Gf(s) \cdot G\tau(s)$ の応答波形が、 αx が1の場合に比べて図4における $Kx \cdot G\tau(s)$ の波形に $(1-\alpha x)$ を乗じた波形を減じたものに変化する。このように、フィードフォワードゲイン αx 、 αv 、 $\alpha\tau$ を1から変更することにより、フィードバックゲイン Kv 、 Kx 、 Ki を変更することなく、すなわち外乱応答は例えば、図2に示すように最適に保ったまま、また位置指令 x_r に対する実位置 x_m の応答をあまり遅くすることなく、位置指令 x_r に対する実位置 x_m の応答を調整することが可能になる。

【0058】また、制御対象1のモデル誤差の特性は様々であり、このような不確かさにきめ細かく対応してなるべく速く整定させるためには、位置フィードフォワードゲイン αx 、速度フィードフォワードゲイン αv およびトルクフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ を独立に調整することにより、フィードバックゲイン Kv 、 Kx 、 Ki を最適な値に固定したまま、不確かさにきめ細かく対応して、なるべく速く整定させることが可能になる。

【0059】また、図2に示したように、フィードバックゲイン Kv 、 Kx 、 Ki の通常の調整では、外乱応答 $G\tau(s)$ のステップ応答は符号が正の方向のみに応答するため、位置指令 x_r に対する実位置 x_m の応答がオーバーシュートを起こした場合、前述のように αx を小さくすれば、必ずオーバーシュートを抑制する方向へ作用する。そこで一例として、図5に、制御対象1の特性を理想モデルとしたシミュレーションで、速度フィード

20

*ゲイン $\alpha\tau$ は1に固定したまま、 αx を小さく変化させた場合の $Gf(s) \cdot G\tau(s)$ の応答の変化の様子を示す。図5に示した $Gf(s) \cdot G\tau(s)$ の応答の変化より、実際の実位置 x_m の応答が微少なオーバーシュートを起こした場合は、位置フィードフォワードゲイン αx だけを1より少し小さくすることにより、簡単な制御器内の演算と簡単な調整でオーバーシュートを抑制することが可能である。

【0060】また、上記では位置フィードフォワードゲイン αx だけを小さくするとしたが、図5に示した位置フィードフォワードゲイン αx だけを1より小さくした場合の $Gf(s) \cdot G\tau(s)$ のステップ応答は、時刻0の直後に1まで立上り、その後一旦小さくなり再び緩やかに上昇して1に達している。すなわち位置指令 x_r に対するトルク指令 τ_r には、オーバーシュートの抑制にはあまり関与しない高い周波数成分が大きく含まれている。一方、制御対象1の高周波数領域における特性には機械共振が含まれていることが多いため、オーバーシュート抑制に寄与しないトルク指令 τ_r の高周波数成分は低減した方が機械共振の抑制効果が大きくなる。したがって、オーバーシュートを抑制するために位置フィードフォワードゲイン αx を1より小さくすると同時に、速度フィードフォワードゲイン αv やトルクフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ も1より小さくした方が振動抑制効果が大きくなり整定時間の短縮につながる。

【0061】ここで、例えば速度フィードフォワードゲイン αv を小さくしたことによる $Gf(s) \cdot G\tau(s)$ のステップ応答の変化は、図4の $Kv \cdot s \cdot G\tau(s)$ の波形に定数を掛けたものを減じることになり、またトルクフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ を小さくしたことによる $Gf(s) \cdot G\tau(s)$ のステップ応答の変化は、図4の $Ja \cdot s^2 \cdot G\tau(s)$ の波形に定数をかけたものを減じることになるため、応答波形は正負の両方向へ変化し、不用意に速度フィードフォワードゲイン αv やトルクフィードフォワードゲイン $\alpha\tau$ を小さくすると、それが逆にオーバーシュートを増大させる原因となったり、特定の周波数成分が残るため応答が振動的になったりする。したがって、フィードフォワードゲイン αx 、 αv 、 $\alpha\tau$ に、適切な関係式を持たせることにより、簡単な調整でオーバーシュートを抑制し、なおかつ振動抑制効果も得ることが可能になる。

【0062】次に、その一例としてフィードフォワードゲイン αx 、 αv 、 $\alpha\tau$ に次の式23の関係を持たせた場合を説明する。

$$\alpha x = \alpha v = \alpha\tau \quad \dots\dots (式23)$$

【0063】上記の式23の関係を持たせてフィードフォワードゲイン αx 、 αv 、 $\alpha\tau$ を1から小さくした場合の $Gf(s) \cdot G\tau(s)$ の応答は、式23より次の式24で表される。

$$Gf(s) \cdot G\tau(s) = \alpha x \cdot Gf_1(s) \cdot G\tau(s) + Ki \cdot (1 - \alpha$$

(12)

21

$$x) \cdot G_{\tau}(s) / s \quad \dots \quad (式24)$$

すなわち、 $G_{f1}(s) \cdot G_{\tau}(s)$ の伝達特性は1に近いので、 $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ のステップ応答波形は、高さ α_x のステップ状変化と、図4に示した $K_i \cdot G_{\tau}(s) / s$ の波形を定数倍したものと和になる。図6に、 $G_{f1}(s) \cdot G_{\tau}(s)$ の伝達特性を1とし、式23の関係を持たせた上でフィードフォワードゲイン α_x を小さくした場合の $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ のステップ応答の変化を示す。図の変化の様子より、 $G_{f1}(s) \cdot G_{\tau}(s)$ が微少なオーバーシュートを起こす場合には、式23の関係を持たせた上でフィードフォワードゲイン α_x 、 α_v 、 α_{τ} を小さくすると、なめらかに、また一つのパラメータ α_x による簡単な調整で、オーバーシュートを抑制することが可能になる。

【0064】次に、一例としてフィードフォワードゲイン α_x 、 α_v 、 α_{τ} に次の式25の関係を持たせた場合を説明する。

$$\alpha_v = \alpha_x^2, \alpha_{\tau} = \alpha_x^3 \quad \dots \quad (式25)$$

【0065】上記の式25の関係を持たせてフィードフォワードゲイン α_x 、 α_v 、 α_{τ} を1から小さくした場合の $G_f(s)$ は下式で表される。

$$G_f(s) = \{J a \cdot (\alpha_x \cdot s)^3 + K_v \cdot (\alpha_x \cdot s)^2 + K_x \cdot \alpha_x \cdot s + K_i\} / s$$

図7に、 $G_{f1}(s) \cdot G_{\tau}(s)$ の伝達特性を1とし、式25の関係を持たせた上でフィードフォワードゲイン α_x を小さくした場合の $G_f(s) \cdot G_{\tau}(s)$ のステップ応答の変化を示す。図の変化の様子より、 $G_{f1}(s) \cdot G_{\tau}(s)$ が微少なオーバーシュートを起こす場合には、式25の関係を持たせた上でフィードフォワードゲイン α_x 、 α_v 、 α_{τ} を小さくすると、立ち上がり性を小さく、すなわち高周波数成分をより小さくしながら、なめらかに、また一つのパラメータ α_x による簡単な調整でオーバーシュートを抑制することが可能になる。

【0066】実施の形態1は以上のように構成することにより、フィードフォワードゲイン設定要素である位置フィードフォワード増幅器12を備え、位置フィードフォワードゲイン α_x を速度フィードフォワードゲイン α_v と独立にかつ速度比例ゲイン K_v 、位置比例ゲイン K_x 、位置積分ゲイン K_i と独立に1以外の値に設定できるため、またトルクフィードフォワードゲイン α_{τ} や速度フィードフォワードゲイン α_v が1のままでも位置フィードフォワード増幅器12における位置フィードフォワードゲイン α_x を1を基準にして小さく微調整することにより、簡単な制御器の演算で、外乱応答を最適に保ったままオーバーシュートを抑制して高速に整定させることが可能である。

【0067】また、実施の形態1はフィードフォワード設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器10と速度フィードフォワード増幅器11と位置フィードフォ

22

ワード増幅器12を備え、フィードフォワードゲイン α_{τ} 、 α_v 、 α_x を互いに独立に、かつフィードバックゲイン K_v 、 K_x 、 K_i と独立に1以外の値に設定できるため、フィードフォワードゲイン α_{τ} 、 α_v 、 α_x を1を基準にきめ細かく微調整することにより、外乱応答を最適に保ったまま、高速に整定させることが可能である。

【0068】さらに、実施の形態1はフィードフォワード設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器10と速度フィードフォワード増幅器11と位置フィードフォワード増幅器12を備え、フィードフォワードゲイン α_{τ} 、 α_v 、 α_x をフィードバックゲイン K_v 、 K_x 、 K_i と独立で適切な関係式を用いて一つのパラメータで設定することによって、フィードフォワードゲイン α_{τ} 、 α_v 、 α_x を1を基準に一つのパラメータ α_x で微調整することにより、外乱応答を最適に保ったままオーバーシュートを抑制して滑らかかつ高速に整定させることが可能である。

【0069】さらに、実施の形態1はモデル信号演算部4における位置指令 x_r からモデル位置 x_a までの応答がローパス特性となるように構成し、フィードフォワード設定要素である位置フィードフォワード増幅器12を備え位置フィードフォワードゲイン α_x を1以外の値に設定できるため、モデル伝達特性 $G_a(s)$ をローパス特性として機械共振の励起を抑制し、位置フィードフォワードゲイン α_x を1を基準にして小さく微調整することにより、外乱応答を最適に保ったまま、振動を抑制し、オーバーシュートを抑制して高速に整定させることが可能である。

【0070】なお、以上の実施の形態1の説明では、トルク指令演算部5においてトルクフィードフォワード増幅器を備えるとして構成したが、モデル信号演算部4における式14の伝達関数演算で、モデルイナーシャ J_a を制御対象1のイナーシャ J にトルクフィードフォワードゲイン α_{τ} を乗じた値にするように構成しても、全く同じ効果を持つことは言うまでもない。

【0071】また、例えば速度比例補償器8の出力などの信号に、ローパスフィルタを挿入したような場合も、本発明の本質的效果に変わりなく、同様の効果を持つことは言うまでもない。更に、高周波の機械共振の抑制は、その条件によっては、モデル信号演算部4の伝達関数をローパス特性とすることによるのではなく、上述した各フィードフォワードゲインの設定を調整することにより行うこともできることは言うまでもない。

【0072】実施の形態2. 図8は実施の形態2の位置制御装置の構成を示すブロック図である。図8において図1と同一符号は同一部分を示し、その説明を省略する。

【0073】105はトルク指令演算部である。106

(13)

23

は位置積分器である。107は速度比例補償器、108は位置比例補償器、109は位置積分補償器である。110はトルクフィードフォワード増幅器、111は速度フィードフォワード増幅器、112は位置フィードフォワード低減器である。

【0074】図1に示した実施の形態1ではモデル位置 x_a に位置フィードフォワードゲイン α_x を乗じたフィードフォワード位置 x_f と実位置との差信号を用いてトルク指令 τ_r を演算していたが、位置指令 x_r の移動距離が大きい場合には、定常的に位置比例補償器8の出力が大きくなり、またこの出力を相殺するように位置積分補償器9の出力信号が大きな値を持つため、計算条件が悪くなる可能性が有るが、この実施の形態2は以上の不具合を解消したものである。

【0075】次に実施の形態2の動作について説明する。実施の形態1と異なる部分であるトルク指令演算部105の動作について説明する。トルク指令演算部105はモデルトルク τ_a とモデル速度 v_a とモデル位置 x_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力する。トルク指令演算部105の内部においてトルクフィードフォワード増幅器110はモデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗じたフィードフォワードトルク τ_f を出力し、速度フィードフォワード増幅器111はモデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗*

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x (x_a - x_m) + K_i \left(\frac{1}{s} \right) (x_a - x_m - \beta_x \cdot v_a) \quad \dots \dots (式26)$$

【0078】ここで、モデル速度 v_a の積分はモデル位置 x_a であるため、信号をトルク、速度、位置、位置の※

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x \{ (1 - K_i \cdot \beta_x / K_x) x_a - x_m \} + K_i \left(\frac{1}{s} \right) (x_a - x_m) \quad \dots \dots (式27)$$

【0079】したがって、位置フィードフォワードゲイン α_x を下式の式28で定義すると、上記の式26の演算は実施の形態1のトルク指令演算部5における式15★

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i \left(\frac{1}{s} \right) (x_a - x_m) \quad \dots \dots (式15)$$

【0081】また位置フィードフォワード低減ゲイン β_x を設定することにより、位置フィードフォワードゲイン α_x を速度フィードフォワードゲイン α_v およびフィードバックゲイン K_v 、 K_x 、 K_i と独立に設定することが可能である。

【0082】上記のように構成することにより、実施の形態2は実施の形態1と全く同様の効果を持ち、しかも、位置指令 x_r が大きくなっても位置比例補償器108の出力が特に大きくなるということがなく、安定した動作特性が得られる。

【0083】実施の形態3. 図9は実施の形態3の制御系を示すブロック図である。図9において図1と同一符号は同一部分を示し、その説明を省略する。

【0084】205はトルク指令演算部である。206は位置補償器、207は速度PI補償器である。210

24

* じたフィードフォワード速度 v_f を出力し、位置フィードフォワード低減器112はモデル速度 v_a に位置フィードフォワード低減ゲイン β_x を乗じたフィードフォワード位置（位置フィードフォワード低減信号） x_f を出力する。

【0076】次に位置積分器106はモデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差から上記の位置フィードフォワード低減信号 x_f を減じた信号を積分した信号を出力し、速度比例補償器107はフィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との偏差に速度比例ゲイン K_v を乗じた信号を出力し、位置比例補償器108はモデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置比例ゲイン K_x を乗じた信号を出力し、位置積分補償器109は位置積分器106の出力信号に位置積分ゲイン K_i を乗じた信号を出力し、トルク指令演算部105はフィードフォワードトルク τ_f と速度比例補償器107の出力と位置比例補償器108の出力と位置積分補償器109との出力の和信号をトルク指令 τ_r として出力することにより制御対象1を制御する。

【0077】以上のように構成することにより、トルク指令演算部105はモデル位置 x_a 、モデル速度 v_a 、モデルトルク τ_a 、実位置 x_m 、実速度 v_m に基づき次の式26の伝達関数演算によりトルク指令 τ_r を出力する。

※積分の次元で纏めるように式26を変換すると、次の式27となる。

★の演算と全く同じになる。

$$\alpha_x = 1 - K_i \cdot \beta_x / K_x \quad \dots \dots (式28)$$

【0080】

はトルクフィードフォワード増幅器、211は速度フィードフォワード増幅器である。

【0085】次に実施の形態3の動作について説明する。実施の形態1と異なる部分であるトルク指令演算部205の動作について説明する。トルク指令演算部205はモデルトルク τ_a とモデル速度 v_a とモデル位置 x_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力する。トルク指令演算部205の内部においてトルクフィードフォワード増幅器210はモデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗じたフィードフォワードトルク τ_f を出力し、速度フィードフォワード増幅器211はモデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗じたフィードフォワード速度 v_f を出力する。

【0086】次に位置補償器206はモデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置ゲイン ω_x を乗じた信号を出

(14)

25

力し、速度PI補償器207はフィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との差信号に位置補償器106の出力を加えた信号を入力し、速度比例ゲイン K_v と積分ゲイン ω_{PI} のPI（比例積分）演算を行って誤差補償トルク τ_c を出力する。また、トルク指令演算部205はフ*

$$\tau_r = \alpha \tau \cdot \tau_a + K_v (1 + \omega_{PI}/s) \{ \alpha v \cdot v_a - v_m + \omega x (x_a - x_m) \} \quad \dots \dots (式29)$$

【0087】ここで、モデル速度 v_a の積分はモデル位置 x_a であるため、信号をトルク、速度、位置、位置の※

$$\tau_r = \alpha \tau \cdot \tau_a + K_v (\alpha v \cdot v_a - v_m) + K_x (\alpha x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m) \quad \dots \dots (式30)$$

ただし、

$$K_x = K_v (\omega x + \omega_{PI}) \quad \dots \dots (式31)$$

$$K_i = K_v \cdot \omega x \cdot \omega_{PI} \quad \dots \dots (式32)$$

$$\alpha x = (\omega x + \alpha v \cdot \omega_{PI}) / (\omega x + \omega_{PI}) \quad \dots \dots (式33)$$

【0088】上記の式31、式32、式33より、式30における位置フィードフォワードゲイン αx は、速度フィードフォワードゲイン αv と独立かつ位置比例ゲイン K_x および位置積分ゲイン K_i と独立に設定することはできない。しかしながら、速度フィードフォワード増幅器211における速度フィードフォワードゲイン αv を1より小さくすることにより式15における位置フィードフォワードゲイン αx も1より小さくなる。また、位置フィードフォワードゲイン αx と速度フィードフォワードゲイン αv との関係は式33により、フィードバックゲインである位置ゲイン ωx と積分ゲイン ω_{PI} との関係で決まるため、フィードバック特性は多少変化するがこの位置ゲイン ωx と積分ゲイン ω_{PI} との大小関係を調整することにより、速度フィードフォワードゲイン αv を小さくすることによって位置フィードフォワードゲイン αx が急速に小さくなり、速度フィードフォワードゲイン αv を調整することでオーバーシュートの抑制が確実にできる。

【0089】また、高周波数の機械共振に対しては、実施の形態1と同様に、モデル信号演算部4におけるモデル伝達特性 $G_a(s)$ の応答周波数 ω_a を小さくすることにより、機械振動抑制効果が大きく得られる。

【0090】以上のように構成することにより、実施の形態3は位置指令 x_r からモデル位置 x_a までの伝達特性がローパス特性をもつモデル信号演算部4を備え、フィードフォワードゲイン設定要素である速度フィードフォワード増幅器211によって位置フィードフォワードゲイン αx を小さくすることにより、外乱抑制効果は多少犠牲にするが、比較的簡単な演算で振動を抑制し、オーバーシュートを抑制して高速に整定させることが可能である。

【0091】実施の形態4. 図10は実施の形態4の制御系を示すブロック図である。図10において図1と同一符号は同一部分を示し、その説明を省略する。

【0092】304は外部から位置指令 x_r を入力しモ

26

*ィードフォワードトルク τ_f と誤差補償トルク τ_c との和信号をトルク指令 τ_r として出力する。すなわちトルク指令演算部205は以下の式29の演算によりトルク指令 τ_r を演算する。

※積分の次元で纏めるように式29を変換すると、次の式30、式31、式32、式33となる。

デル位置 x_a とモデル速度 v_a とモデルトルク τ_a とを出力するモデル信号演算部である。313は第1の微分器である。314は第2の微分器である。315はイナーシャ増幅器である。305はトルク指令演算部である。306は位置補償器、307は速度PI補償器である。310はトルクフィードフォワード増幅器、311は速度フィードフォワード低減器、312は位置フィードフォワード低減器である。

【0093】次に実施の形態4の動作を説明する。モデル信号演算部304は位置指令 x_r を入力し、第1の微分器313は位置指令 x_r を微分して速度指令 v_r を出力し、第2の微分器314は速度指令 v_r を微分して加速度指令 a_r を出力し、イナーシャ増幅器315は加速度指令 a_r に予め設定した制御対象1のイナーシャの推定値 J_a を乗じたモデルトルク τ_a を出力する。

【0094】以上の動作によりモデル信号演算部304では以下の式34、式35、式36の伝達関数演算を行っている。

$$x_a = x_r \quad \dots \dots (式34)$$

$$v_a = s \cdot x_r \quad \dots \dots (式35)$$

$$\tau_a = J_a \cdot s^2 \cdot x_r \quad \dots \dots (式36)$$

【0095】上記の式34、式35、式36より、実施の形態4におけるモデル信号演算部304は、実施の形態1におけるモデル信号演算部4において、モデル伝達特性 $G_a(s)$ を1としたものに他ならない。したがってモデル伝達特性 $G_a(s)$ はローパス特性を持たないが、それ以外の点では実施の形態1と同様の特性を持つ。

【0096】次にトルク指令演算部305の動作について説明する。トルク指令演算部305はモデルトルク τ_a とモデル速度 v_a とモデル位置 x_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力する。トルク指令演算部305の内部においてトルクフィードフォワード増幅器310はモデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ を乗じたフィードフォワードトルク τ_f を出力し、速度フ

(15)

27

ィードフォワード低減器311はモデル速度 v_a に速度フィードフォワード低減ゲイン γ_v を乗じたフィードフォワード速度(速度フィードフォワード低減信号) v_f を出力し、位置フィードフォワード低減器312はモデル位置 x_a に位置フィードフォワード低減ゲイン γ_x を乗じたフィードフォワード位置(位置フィードフォワード低減信号) x_f を出力する。

【0097】次に位置補償器306はモデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置ゲイン ω_x を乗じた信号を出力し、速度PI補償器307はモデル速度 v_a と実速度 v_m

$$\tau_r = \alpha \tau \cdot \tau_a - \gamma_v \cdot v_a - \gamma_x \cdot x_a + K_v \cdot (1 + \omega_{PI}/s) \{v_a - v_m + \omega_x (x_a - x_m)\} \quad \dots \text{(式37)}$$

【0098】ここで、モデル速度 v_a の積分はモデル位置 x_a 、実速度 v_m の積分は実位置 x_m であるため、信号をトルク、速度、位置、位置の積分の次元で纏めるよ※

$$\tau_r = \alpha \tau \cdot \tau_a + K_v (\alpha v \cdot v_a - v_m) + K_x (\alpha x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m) \quad \dots \text{(式38)}$$

ただし、

$$K_x = K_v (\omega_x + \omega_{PI}) \quad \dots \text{(式39)}$$

$$K_i = K_v \cdot \omega_x \cdot \omega_{PI} \quad \dots \text{(式40)}$$

$$\alpha v = 1 - \gamma_v / K_v \quad \dots \text{(式41)}$$

$$\alpha x = 1 - \gamma_x / K_x \quad \dots \text{(式42)}$$

【0099】したがって、速度フィードフォワード低減器311で速度フィードフォワード低減ゲイン γ_v を設定することにより速度フィードフォワードゲイン αv を独立に設定でき、位置フィードフォワード低減器312で位置フィードフォワード低減ゲイン γ_x を設定することにより位置フィードフォワードゲイン αx を独立に設定できる。

【0100】実施の形態4は以上のように構成することにより、フィードバック制御系を位置補償器と速度PI補償器とで構成する場合にも、フィードフォワードゲイン設定要素である位置フィードフォワード低減器312を備え、位置フィードフォワードゲイン αx を速度フィードフォワードゲイン αv と独立にかつフィードバックゲインと独立に1以外の値に設定できるため、またトルクフィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ や速度フィードフォワードゲイン αv が1のままでも位置フィードフォワードゲイン αx を1を基準にして小さく微調整することにより、簡単な制御器の演算で、外乱応答を最適に保ったままオーバーシュートを抑制して高速に整定させることが可能である。

【0101】また、実施の形態4はフィードフォワード設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器310と速度フィードフォワード低減器311と位置フィードフォワード低減器312を備え、フィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ 、 αv 、 αx を互いに独立に、かつフィードバックゲインと独立に1以外の値に設定できるため、フィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ 、 αv 、 αx を1を基準にきめ細かく微調整することにより、外乱応答を最適に保つ

28

* v_m との偏差に位置補償器306の出力を加えた信号を入力し、速度比例ゲイン K_v と積分ゲイン ω_{PI} のPI(比例積分)演算を行って誤差補償トルク τ_c を出力する。また、トルク指令演算部305はフィードフォワードトルク τ_f から速度フィードフォワード低減信号 v_f と位置フィードフォワード低減信号 x_f とを減算した信号に誤差補償トルク τ_c を加算した信号をトルク指令 τ_r として出力する。すなわちトルク指令演算部305は以下の式37の演算によりトルク指令 τ_r を演算する。

※うに式37を変換すると、次の式38、式39、式40、式41となる。

たまた、高速に整定させることが可能である。

【0102】実施の形態5. 図11は実施の形態5の制御系構成を示すブロック図である。図11において図1と同一符号は同一部分を示し、その説明を省略する。

【0103】405はトルク指令演算部である。406は積分器である。407は速度比例補償器、408は位置比例補償器、409は位置積分補償器である。410はトルクフィードフォワード増幅器、411は速度フィードフォワード増幅器である。

【0104】次に実施の形態5の動作について説明する。実施の形態1と異なる部分であるトルク指令演算部405の動作について説明する。トルク指令演算部405はモデルトルク τ_a とモデル速度 v_a とモデル位置 x_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力する。トルク指令演算部405の内部においてトルクフィードフォワード増幅器410はモデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン $\alpha \tau$ を乗じたフィードフォワードトルク τ_f を出力し、速度フィードフォワード増幅器411はモデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン αv を乗じたフィードフォワード速度 v_f を出力する。

【0105】次に位置積分補償器409はモデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置積分ゲイン ω_i を乗じた信号を出力し、積分器406は位置積分補償器409の出力からモデル速度 v_a とフィードフォワード速度 v_f との差信号を減算した信号を入力し積分した信号を出力する。次に位置比例補償器408はモデル位置 x_a と実位置 x_m との差信号に積分器406の出力を加算した信号を入力し、位置ゲイン ω_x を乗じた信号を出力する。次に速度比例補償器407はフィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との差信号に位置比例補償器408の出力を加算した信号を入力し速度比例ゲイン K_v を乗じた信号を出力し、トルク指令演算部405は速度比例補償器407の出力とフィードフォワードトルク τ_f との和

(16)

29

信号をトルク指令 τ_r として出力する。すなわちトルク
指令演算部405は次の式43の演算によりトルク指令*

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v [\alpha_v \cdot v_a - v_m + \omega_x \{x_a - x_m + (1/s) (\omega_i (x_a - x_m) - (1 - \alpha_v) v_a)\}] \dots (式43)$$

【0106】ここで、モデル速度 v_a の積分はモデル位
置 x_a であるため、信号をトルク、速度、位置、位置の※

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m) \dots (式44)$$

ただし、

$$K_x = \omega_x \cdot K_v \dots (式45)$$

$$K_i = \omega_i \cdot \omega_x \cdot K_v \dots (式46)$$

$$\alpha_x = \alpha_v \dots (式47)$$

【0107】上記の式45、式46、式47より、式1
5における位置フィードフォワードゲイン α_x は、速度
フィードフォワードゲイン α_v と同じ値になる。またフ
ィードフォワードゲイン設定要素であるトルクフィード
フォワード増幅器410によりトルクフィードフォワード
ゲイン α_τ を、また速度フィードフォワード増幅器4
11の速度フィードフォワードゲイン α_v を設定するこ
とにより、速度フィードフォワードゲイン α_v および位
置フィードフォワードゲイン α_x を、フィードバックゲ
インと独立に設定することが可能である。更に、図11
におけるトルクフィードフォワードゲイン α_τ を速度フ
ィードフォワードゲイン α_v と同じ値にするような関係
式を持たせると、式44におけるフィードフォワードゲ
イン α_τ 、 α_v 、 α_x の間に実施の形態1における式2
3の関係が成立するため、実施の形態1と同様に一つの
パラメータ α_v で滑らかにオーバーシュートを抑制する
ように調整できる。

【0108】実施の形態5は以上のように構成すること
により、フィードフォワード設定要素であるトルクフィ
ードフォワード増幅器410と速度フィードフォワード
増幅器411を備え、比較的簡単な演算で、位置フィ
ードフォワードゲイン α_x と速度フィードフォワードゲ
イン α_v とを良好な関係に保ったまま、フィードフォ
ワードゲイン α_τ 、 α_v 、 α_x の全てをフィードバックゲ
インと独立に1以外の値に設定できるため、オーバー
シュートを抑制し、外乱応答を最適に保ったまま、高
速に整定させることが可能である。

【0109】また、実施の形態5はフィードフォワード
設定要素であるトルクフィードフォワード増幅器410
と速度フィードフォワード増幅器411を備え、フィ
ードフォワードゲイン α_τ 、 α_v 、 α_x をフィードバック
ゲインと独立で適切な関係式を用いて一つのパラメ
ータで設定することによって、フィードフォワードゲ
イン α_τ 、 α_v 、 α_x を1を基準に一つのパラメータ α_v で微
調整することにより、外乱応答を最適に保ったまま
オーバーシュートを抑制して滑らかかつ高速に整定
させることが可能である。

【0110】なお、この発明は、上記各実施の形態で説

30

* τ_r を演算する。

※積分の次元で纏めるように式43を変換すると、次の式
44、式45、式46、式47となる。

明した具体的回路構成例に限られるものではなく、上記
した所定のモデル信号演算部およびフィードバック制御
部とフィードフォワード制御部とを有するトルク指令演
算部を備え、位置フィードフォワードゲインを速度フィ
ードフォワードゲインと独立に、かつフィードバックゲ
インと独立に、また、位置、速度、トルクの各フィード
フォワードゲインのすべてをフィードバックゲインと独
立に設定可能とする種々の回路構成例に適用できること
は言うまでもない。

【0111】

【発明の効果】以上のように、この発明に係る位置制御
装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデル
トルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモ
デル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィ
ードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部
からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と
上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信
号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のト
ルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位
置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応
じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御
装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例
ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなる
フィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィ
ードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲ
イン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィ
ードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲ
インを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワード
ゲインを上記速度フィードフォワードゲインと独立に、か
つ上記フィードバックゲインと独立に1以外の値に設定
可能な構成としたので、位置フィードフォワードゲ
インを1を基準に小さくするという簡単な微調整により、
外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュ
ートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することが
できる。

【0112】また、この発明に係る位置制御装置は、位
置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モ
デル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演
算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワ
ード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデル
トルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対
象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実

(17)

31

速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、上記位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとのすべてを上記フィードバックゲインと独立に設定可能な構成としたので、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを1を基準に変更するという簡単な微調整により、外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0113】また、この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを互いに独立に設定可能な構成としたので、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを独立に1を基準に変更するという簡単な微調整により、外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0114】また、この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、フィードバックゲインと独立な関係式を用いて設定する構成としたので、外乱に対する特性を最適に保ったまま、より簡単な微調整でオーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0115】また、この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲインと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたので、外乱に対する特性を最適に保ったまま、1つのパラメータによる簡単な微調整で滑らかにオーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

(位置フィードフォワードゲイン) = (速度フィードフォワードゲイン) = (トルクフィードフォワードゲイン)

【0116】また、この発明に係る位置制御装置のフィードフォワード制御部は、位置フィードフォワードゲイン

32

ンと速度フィードフォワードゲインとトルクフィードフォワードゲインとを、次式の関係を用いて設定する構成としたので、外乱に対する特性を最適に保ったまま、1つのパラメータによる簡単な微調整で滑らかにオーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

(トルクフィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン) 3

(速度フィードフォワードゲイン) = (位置フィードフォワードゲイン) 2

【0117】また、この発明に係る位置制御装置は、外部からの位置指令 x_r と制御対象の位置検出信号である実位置 x_m 、速度検出信号である実速度 v_m とを入力しトルク指令 τ_r を出力し、上記実位置 x_m が上記位置指令 x_r に一致するように上記トルク指令 τ_r に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 x_r を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 x_a とこのモデル位置 x_a の微分信号であるモデル速度 v_a とこのモデル速度 v_a の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク τ_a とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク τ_a とモデル速度 v_a とモデル位置 x_a と実速度 v_m と実位置 x_m とを入力し、位置比例ゲイン K_x と速度比例ゲイン K_v と位置積分ゲイン K_i とトルクフィードフォワードゲイン α_τ と速度フィードフォワードゲイン α_v と位置フィードフォワードゲイン α_x とを用いた次式で表される演算に基づいて上記トルク指令 τ_r を出力するトルク指令演算部を備えたので、各フィードフォワードゲイン α_x 、 α_v 、 α_τ を適宜微調整することにより、各フィードバックゲイン K_x 、 K_v 、 K_i で決まる外乱に対する特性を最適に保ったまま、オーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

$$\tau_r = \alpha_\tau \cdot \tau_a + K_v \cdot (\alpha_v \cdot v_a - v_m) + K_x \cdot (\alpha_x \cdot x_a - x_m) + K_i (1/s) (x_a - x_m)$$

s : ラプラス演算子

【0118】また、この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗算したフィードフォワード速度 v_f を出力する速度フィードフォワード増幅器、モデル位置 x_a に位置フィードフォワードゲイン α_x を乗算したフィードフォワード位置 x_f を出力する位置フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との偏差に速度比例ゲイン K_v を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記フィードフォー

(18)

33

ド位置 x_f と実位置 x_m との偏差に位置比例ゲイン K_x を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン K_i を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、上記フィードフォワードトルク τ_f および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 τ_r として出力するので、各フィードフォワード増幅器により、トルク、速度、位置フィードフォワードゲインのそれぞれを直接設定することができ、その設定の調整がより確実になされる。

【0119】また、この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗算したフィードフォワード速度 v_f を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル速度 v_a に位置フィードフォワード低減ゲイン β_x を乗算したフィードフォワード位置 x_f を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差から上記フィードフォワード位置 x_f を減算した信号を積分した信号を出力する位置積分器、上記フィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との偏差に速度比例ゲイン K_v を乗算した信号を出力する速度比例補償器、上記モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置比例ゲイン K_x を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記位置積分器の出力に位置積分ゲイン K_i を乗算した信号を出力する位置積分補償器を備え、位置フィードフォワードゲイン α_x は次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク τ_f および上記速度比例補償器、位置比例補償器、位置積分補償器の出力信号の加算値をトルク指令 τ_r として出力するので、位置指令 x_r が大きい場合も、安定した制御動作がなされる。

$$\alpha_x = 1 - K_i \cdot \beta_x / K_x$$

【0120】また、この発明に係る位置制御装置のトルク指令演算部は、モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f を出力するトルクフィードフォワード増幅器、モデル速度 v_a に速度フィードフォワード低減ゲイン γ_v を乗算したフィードフォワード速度 v_f を出力する速度フィードフォワード低減器、モデル位置 x_a に位置フィードフォワード低減ゲイン γ_x を乗算したフィードフォワード位置 x_f を出力する位置フィードフォワード低減器、モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置ゲイン ω_x を乗算した信号を出力する位置補償器、および上記モデル速度 v_a と実速度 v_m との偏差に上記位置補償器の出力を加算した信号を入力し、速度比例ゲイン K_v と積分ゲイン ω_{PI} の PI （比例積分）演算を行って誤差補償トルク τ_c を出力する速度 PI 補償器を備え、速度フィードフォワードゲイン α_v および位置フィードフォ

34

ワードゲイン α_x はそれぞれ次式で設定するとともに、上記フィードフォワードトルク τ_f からフィードフォワード速度 v_f とフィードフォワード位置 x_f とを減算した信号に誤差補償トルク τ_c を加算した信号をトルク指令 τ_r として出力するので、フィードバック制御部が速度 PI 補償器と位置補償器とで構成されている場合においても、フィードフォワードゲイン α_x 、 α_v 、 α_τ を互いに独立に、かつフィードバックゲインと独立に設定することができる。

$$\alpha_v = 1 - \gamma_v / K_v$$

$$\alpha_x = 1 - \gamma_x / \{K_v (\omega_x + \omega_{PI})\}$$

【0121】また、この発明に係る位置制御装置は、外部からの位置指令 x_r と制御対象の位置検出信号である実位置 x_m 、速度検出信号である実速度 v_m とを入力しトルク指令 τ_r を出力し、上記実位置 x_m が上記位置指令 x_r に一致するように上記トルク指令 τ_r に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記位置指令 x_r を入力して所定の伝達関数演算により演算したモデル位置 x_a とこのモデル位置 x_a の微分信号であるモデル速度 v_a とこのモデル速度 v_a の微分信号であるモデル加速度に上記制御対象のイナーシャ推定値を乗じたモデルトルク τ_a とを出力するモデル信号演算部、および上記モデルトルク τ_a にトルクフィードフォワードゲイン α_τ を乗算したフィードフォワードトルク τ_f を出力するトルクフィードフォワード増幅器、上記モデル速度 v_a に速度フィードフォワードゲイン α_v を乗算したフィードフォワード速度 v_f を出力する速度フィードフォワード増幅器、上記モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に位置積分ゲイン ω_i を乗算した信号を出力する位置積分補償器、位置積分補償器の出力から上記モデル速度 v_a とフィードフォワード速度 v_f との偏差を減算した信号を積分した信号を出力する積分器、上記モデル位置 x_a と実位置 x_m との偏差に上記積分器の出力を加算した信号に位置ゲイン ω_x を乗算した信号を出力する位置比例補償器、および上記フィードフォワード速度 v_f と実速度 v_m との偏差に上記位置比例補償器の出力を加算した信号に速度比例ゲイン K_v を乗算した信号を出力する速度比例補償器を設け、上記フィードフォワードトルク τ_f と速度比例補償器の出力信号との加算値をトルク指令 τ_r として出力するトルク指令演算部を備え、位置フィードフォワードゲイン α_x を下式で設定するので、比較的簡単な演算で、位置フィードフォワードゲイン α_x と速度フィードフォワードゲイン α_v とを良好な関係に保ったまま、フィードフォワードゲイン α_x 、 α_v 、 α_τ のすべてをフィードバックゲインと独立に設定することができる。 $\alpha_x = \alpha_v$

【0122】また、この発明に係る位置制御装置のモデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成したので、トルクフィードフォワードゲ

(19)

35

イン $\alpha\tau$ と速度フィードフォワードゲイン αv と位置フィードフォワードゲイン αx とを1を基準に最適に調整することにより、外乱に対する特性を最適に保ったまま、機械共振の励起を抑制しながら、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【0123】また、この発明に係る位置制御装置は、位置指令を入力し制御対象を想定した、モデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号を作成するモデル信号演算部、およびフィードバック制御部とフィードフォワード制御部とを有し、このモデル信号演算部からのモデルトルク、モデル速度、モデル位置の各信号と上記制御対象の位置検出信号である実位置、速度検出信号である実速度の各信号とを入力し、上記制御対象のトルク指令を作成するトルク指令演算部を備え、上記実位置が上記位置指令に一致するように上記トルク指令に応じたトルクを発生して上記制御対象を制御する位置制御装置において、上記モデル信号演算部は、その位置指令からモデル位置までの伝達特性が所定の周波数以上をカットするローパス特性となるように構成し、上記フィードバック制御部は、位置比例ゲイン、速度比例ゲインおよび位置積分ゲインからなるフィードバックゲインを設定する手段を備え、上記フィードフォワード制御部は、トルクフィードフォワードゲイン、速度フィードフォワードゲインおよび位置フィードフォワードゲインからなるフィードフォワードゲインを設定する手段を備え、かつ、少なくとも上記位置フィードフォワードゲインは1以外の値に設定可能な構成としたので、位置フィードフォワードゲインを1を基準に小さくするという簡単な微調整で、外乱に対する特性を最適に保ったまま、機械共振の励起を抑制しながらオーバーシュートを抑制でき、高速に整定可能な制御を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の実施の形態1の位置制御装置の構成図である。

【図2】 通常の制御系の外乱に対する応答波形を示す図である。

【図3】 一般的な二自由度制御系も構成図である。

【図4】 本発明の信号の応答特性を示す図である。

【図5】 本発明の実施の形態1における応答変化の一例を示す図である。

36

【図6】 本発明の実施の形態1における応答変化の一例を示す図である。

【図7】 本発明の実施の形態1における応答変化の一例を示す図である。

【図8】 本発明の実施の形態2の位置制御装置の構成図である。

【図9】 本発明の実施の形態3の位置制御装置の構成図である。

【図10】 本発明の実施の形態4の位置制御装置の構成図である。

【図11】 本発明の実施の形態5の位置制御装置の構成図である。

【図12】 第1の従来技術の位置制御装置の構成図である。

【図13】 第2の従来技術の位置制御装置の構成図である。

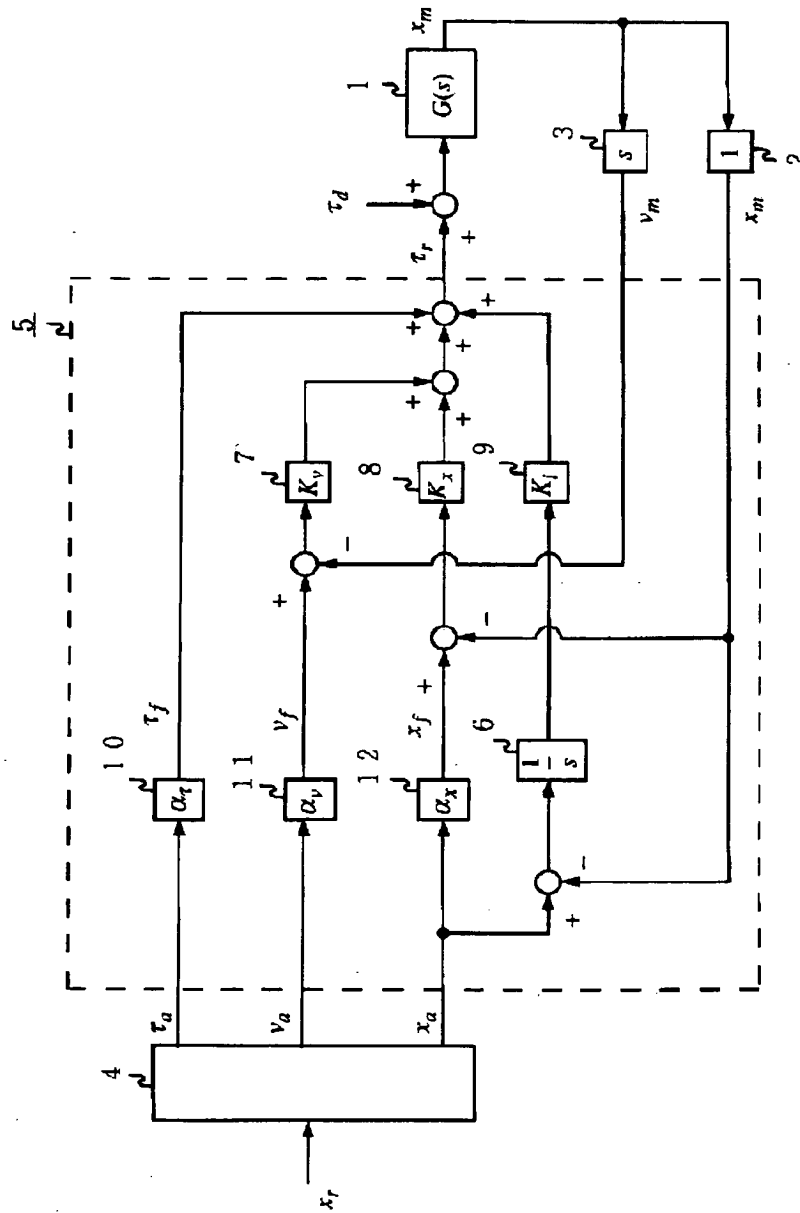
【符号の説明】

1 制御対象、2 位置検出器、3 速度検出器、4、30 4 モデル信号演算部、5、10 5、20 5、30 5、40 5 トルク指令演算部、6、10 6 位置積分器、7、10 7 速度比例補償器、8、10 8 位置比例補償器、9、10 9 位置積分補償器、10、11 0、21 0、31 0、41 0 トルクフィードフォワード増幅器、11、11 1、21 1、41 1 速度フィードフォワード増幅器、12 位置フィードフォワード増幅器、11 2 位置フィードフォワード低減器、20 6、30 6 位置補償器、20 7、30 7 速度PI補償器、31 1 速度フィードフォワード低減器、31 2 位置フィードフォワード低減器、40 6 積分器、40 7 速度比例補償器、40 8 位置比例補償器、40 9 位置積分補償器、 x_r 位置指令、 x_m 実位置、 v_m 実速度、 τ_a モデルトルク、 v_a モデル速度、 x_a モデル位置、 $\alpha\tau$ トルクフィードフォワードゲイン、 αv 速度フィードフォワードゲイン、 αx 位置フィードフォワードゲイン、 τ_f フィードフォワードトルク、 v_f フィードフォワード速度、 x_f フィードフォワード位置、 βx 位置フィードフォワード低減ゲイン、 γv 速度フィードフォワード低減ゲイン、 γx 位置フィードフォワード低減ゲイン。

40

(20)

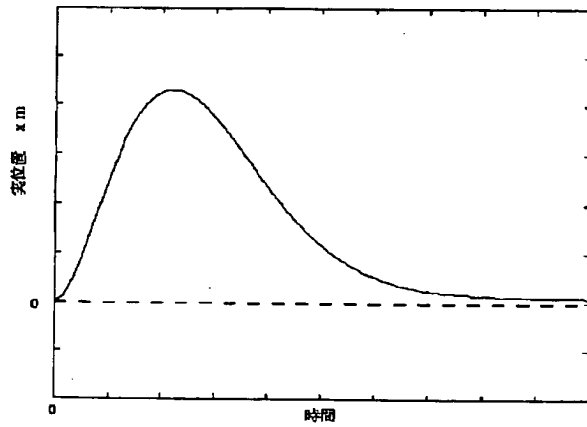
【図 1】



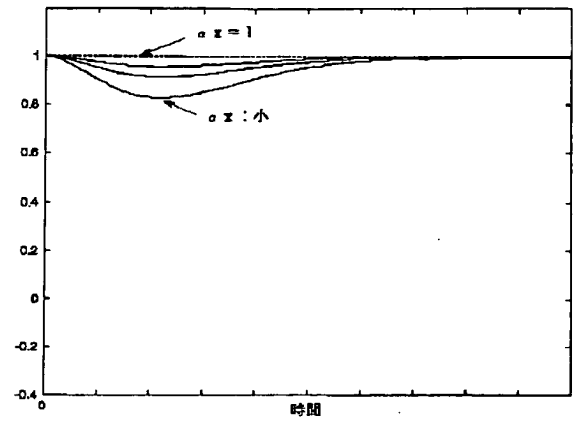
- | | | | |
|----|-------------|---------------|----------------|
| 1 | 制御対象 | $\alpha \tau$ | トルクイット・フック・ゲイン |
| 2 | 位置検出器 | αv | 速度フック・フック・ゲイン |
| 3 | 速度検出器 | αx | 位置フック・フック・ゲイン |
| 4 | モデル信号演算部 | τf | フック・フック・トルク |
| 5 | トルク指令演算部 | $v f$ | フック・フック・速度 |
| 6 | 位置積分器 | $x a$ | フック・フック・位置 |
| 7 | 速度比例補償器 | $x r$ | 位置指令 |
| 8 | 位置比例補償器 | $x m$ | 実位置 |
| 9 | 位置積分補償器 | $v m$ | 実速度 |
| 10 | トルク・フック・増幅器 | τa | モデルトルク |
| 11 | 速度・フック・増幅器 | $v a$ | モデル速度 |
| 12 | 位置・フック・増幅器 | $x a$ | モデル位置 |

(21)

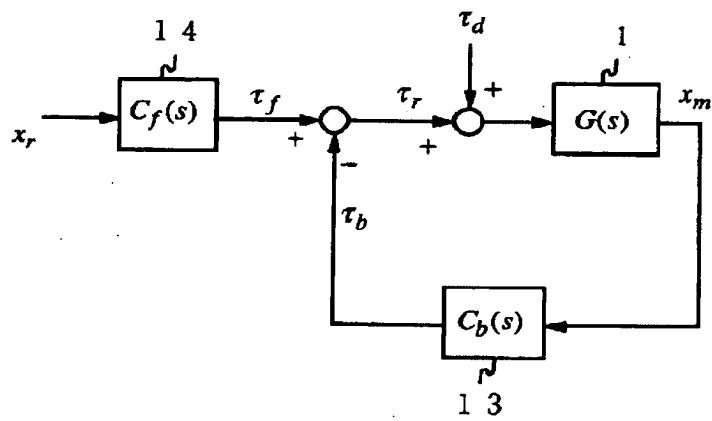
【図2】



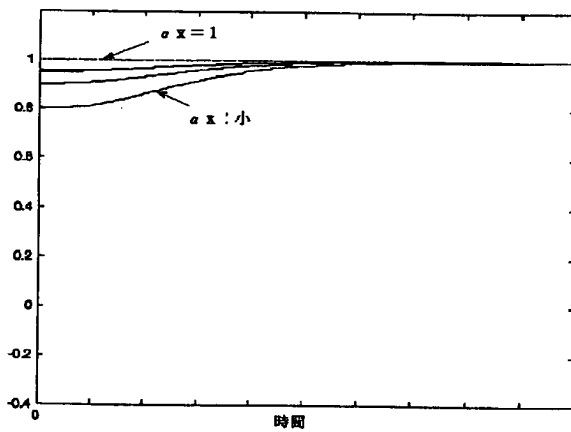
【図5】



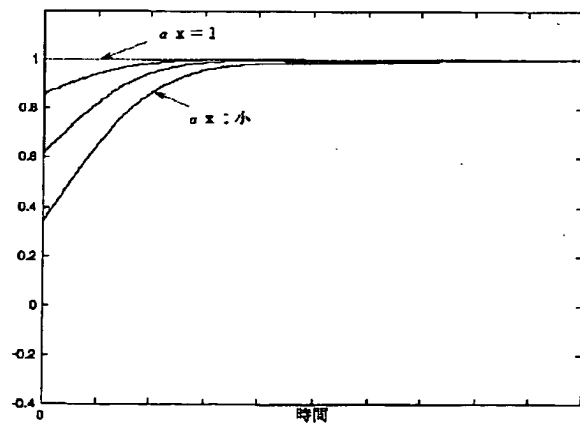
【図3】



【図6】

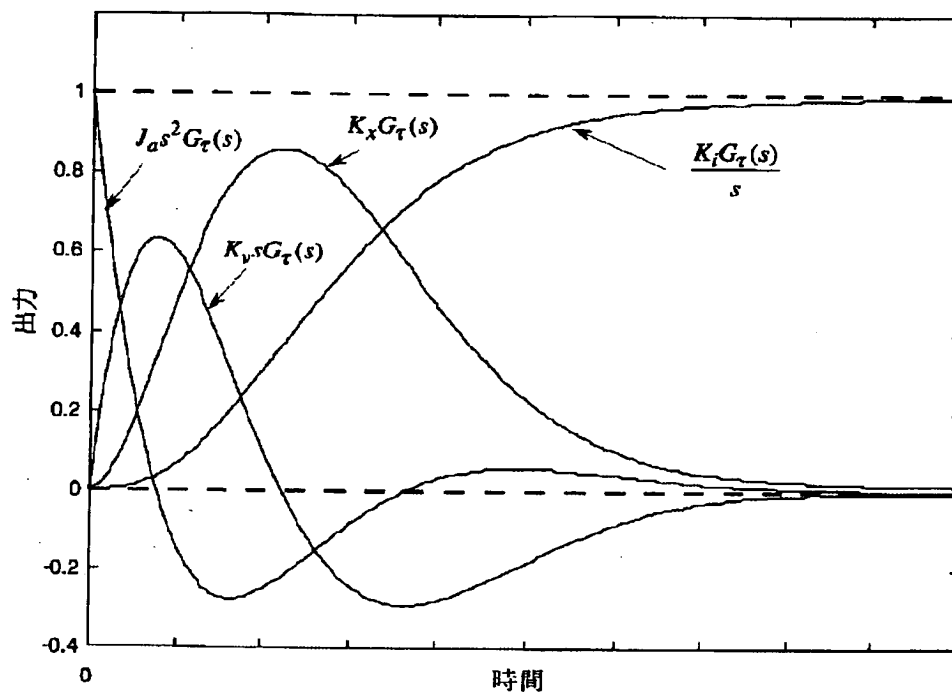


【図7】

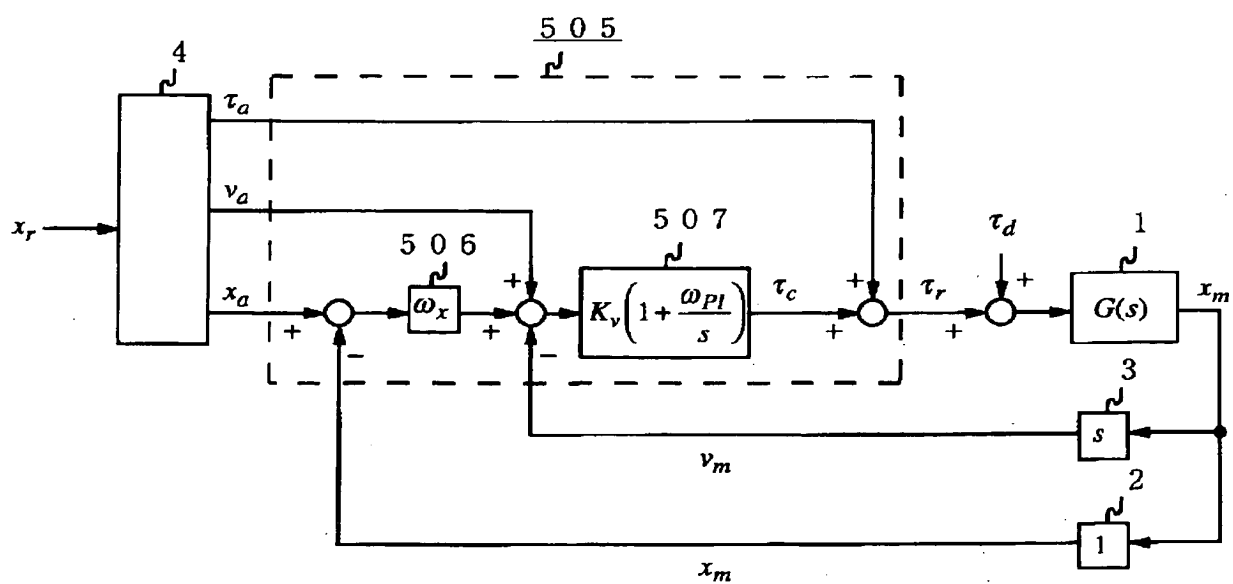


(22)

【図4】

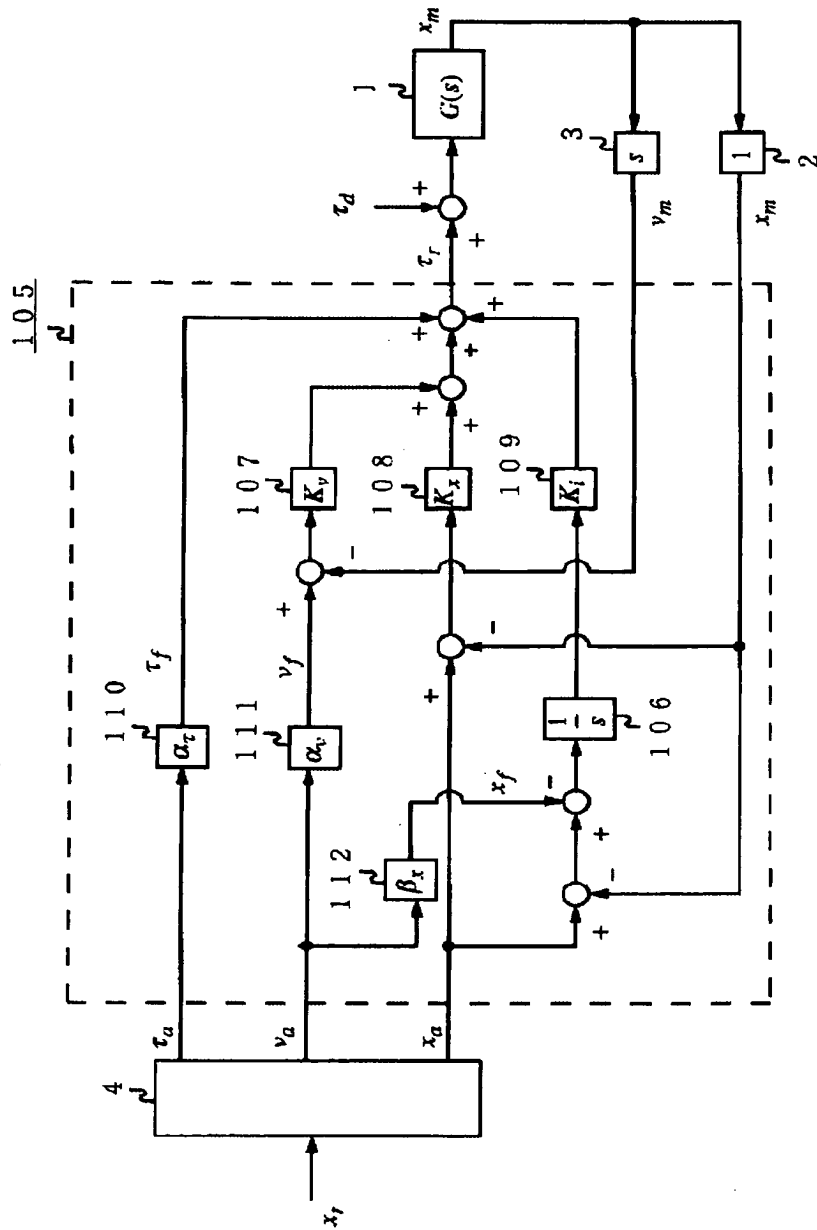


【図12】



(23)

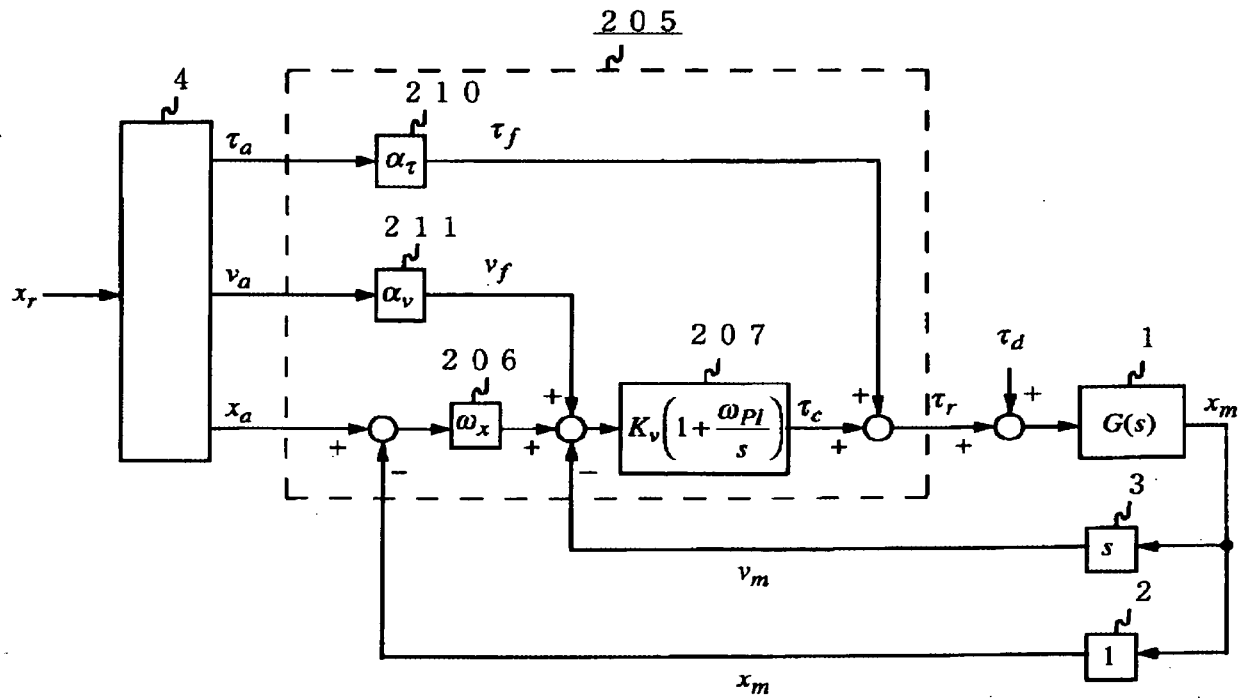
【図8】



- 105: トルク指令演算部
 106: 位置積分器
 107: 速度比例補償器
 108: 位置比例補償器
 109: 位置積分補償器
 110: トルクフィードバック増幅器
 111: 速度フィードバック増幅器
 112: 位置フィードバック低減器
 βx : 位置フィードバック低減ゲイン

(24)

【図9】

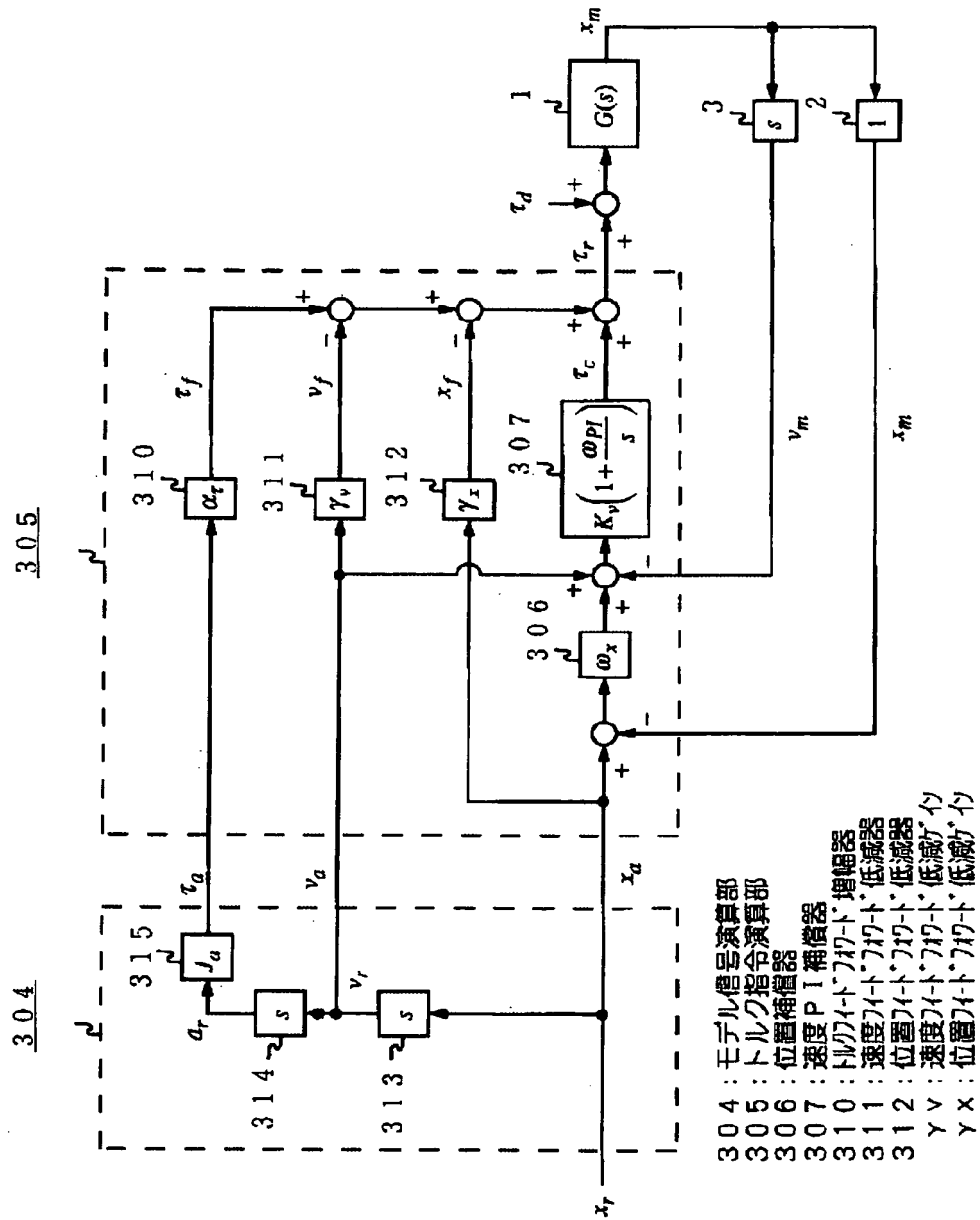


2 0 5 : トルク指令演算部
 2 0 6 : 位置補償器
 2 0 7 : 速度 P I 補償器

2 1 0 : トルクフィードバック増幅器
 2 1 1 : 速度フィードバック増幅器

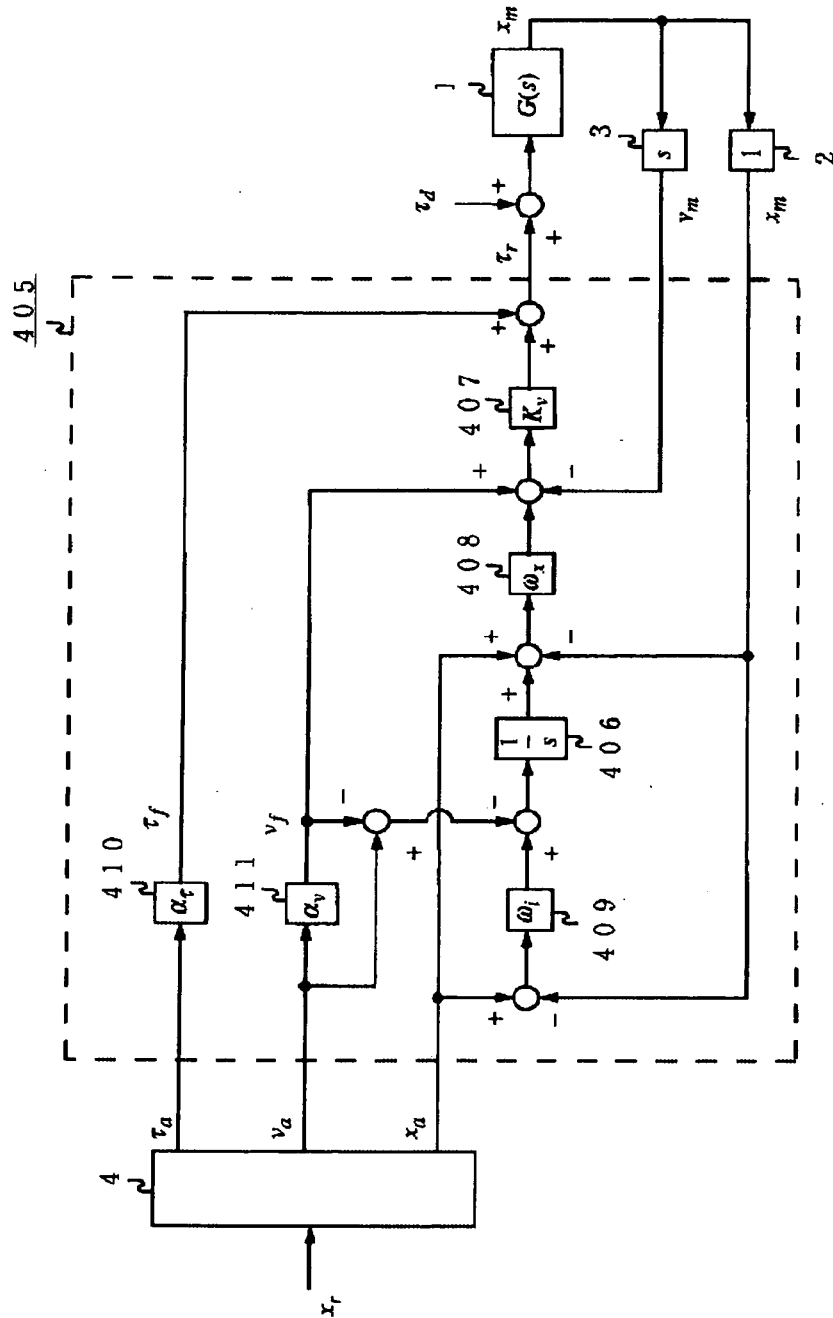
(25)

【図 10】



(26)

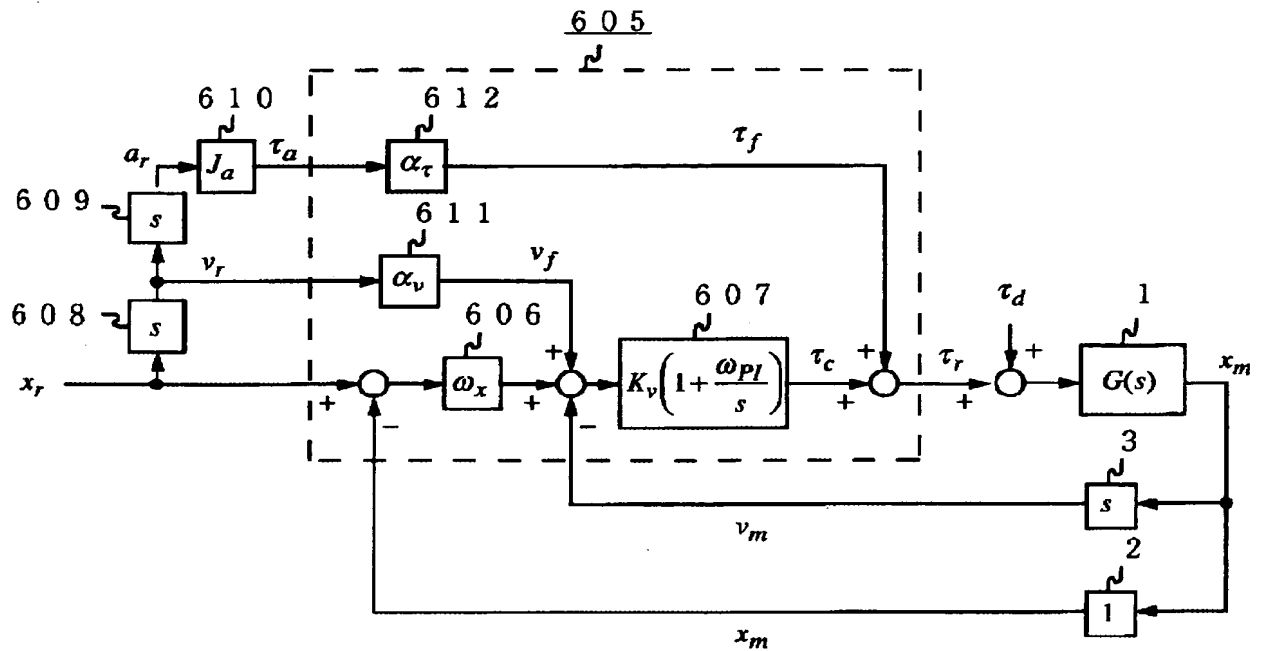
【図 1 1】



4 0 5 : トルク指令演算部
4 0 6 : 積分器
4 0 7 : 速度比例補償器
4 0 8 : 位置比例補償器
4 0 9 : 位置積分補償器
4 1 0 : フォワード・フィード・バック増幅器
4 1 1 : 速度フィード・バック・増幅器

(27)

【図13】



フロントページの続き

(72)発明者 寺田 啓
 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三
 菱電機株式会社内

(72)発明者 吉田 雅彦
 東京都千代田区丸の内二丁目2番3号 三
 菱電機株式会社内

Fターム(参考) 5H004 GA03 GA05 GB15 HA07 HB07
 HB08 JA11 JB09 KB32 KB37
 KB38 KC27 LA02 LA13

5H303 AA01 CC05 DD01 FF03 HH01
 JJ01 KK02 KK03 KK11 KK28

5H550 AA18 BB10 DD01 EE05 GG01
 GG03 GG10 HB08 JJ04 JJ11
 JJ23 JJ24 JJ25 JJ26 LL01
 LL32 LL34

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☒ **OTHER: _____**

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.